

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC
MESTRADO PROFISSIONAL

FABIANO RAMOS RODRIGUES

ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO AISI P20
COM UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COM TRATAMENTO E SEM
TRATAMENTO DO GUME

CAXIAS DO SUL

2025

FABIANO RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO AISI P20
COM UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COM TRATAMENTO E SEM
TRATAMENTO DO GUME**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado Profissional em Engenharia
Mecânica da Universidade de Caxias do Sul,
para obtenção de grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso
Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

R696a Rodrigues, Fabiano Ramos

Análise da qualidade superficial no fresamento do aço AISI P20 com utilização de ferramentas com tratamento e sem tratamento do gume [recurso eletrônico] / Fabiano Ramos Rodrigues. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Usinagem. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Retificação e polimento. 4. Máquinas-ferramenta. 5. Ferramentas. 6. Aço. 7. Engenharia mecânica. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.98

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

FABIANO RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO AISI P20
COM UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COM TRATAMENTO E SEM
TRATAMENTO DO GUME**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado Profissional em Engenharia
Mecânica da Universidade de Caxias do Sul,
para obtenção de grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.
Área de concentração: Projeto e fabricação.

Aprovado em: 15 de julho de 2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann – Orientador
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin
IFRS- Câmpus Caxias do Sul

Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

CAXIAS DO SUL

2025

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação de polimento por arraste em fresas de metal duro, destacando a importância dos processos de usinagem na cadeia produtiva e econômica global. No contexto das ferramentas, este trabalho se concentra nos efeitos da preparação da ferramenta por meio do polimento por mídia abrasiva. O material escolhido para os testes o aço SAE P20, amplamente utilizado em moldes e matrizes, especialmente para materiais poliméricos. Considerando as mudanças na área superficial, denominada qualidade superficial, o estudo inclui ensaios experimentais comparando ferramentas originais e ferramentas polidas pelo método de arraste em mídia abrasiva. A metodologia envolve a execução de um planejamento de experimentos (DOE) para avaliar se os valores gerados pelo sistema podem ser computados pelo equipamento de usinagem. Após essa validação são realizadas usinagens em diferentes partes do corpo de prova, utilizando os dados gerados pelo DOE. A análise do corpo de prova inclui a avaliação da rugosidade para a qualidade superficial resultante da usinagem. Este estudo contribui para o avanço no entendimento dos efeitos do polimento por arraste em fresas de metal duro, proporcionando dados valiosos sobre a qualidade superficial em materiais específicos, como o aço SAE P20. Os resultados obtidos demonstram que o tratamento do gume resultou em melhorias aproximadas de 12%, porém não foi o fator predominante para qualidade superficial do material usinado.

Palavras-chave: ferramentas; polimento por arraste; qualidade superficial.

ABSTRACT

This work addresses the application of drag polishing on carbide end mills, emphasizing the importance of machining processes in the global production and economic chain. With the constant evolution of technology in machining equipment, it is crucial to ensure that tools can withstand the loads applied during machining processes. The need for high production rates and competitiveness drives the search for more efficient and reliable tools, processes, and equipment, providing study opportunities in various areas such as tools, materials, machines, processes, removal strategies, and cutting fluids. In the context of tools, this work focuses on the effects of tool preparation through abrasive media drag polishing. The chosen material for the tests is SAE P20 steel, widely used in molds and dies, especially for polymeric materials. Considering changes in the surface area, known as surface quality, caused by contact with polymeric materials, the study includes experimental tests comparing original tools and tools polished by the drag polishing method with abrasive media. One methodology involves performing a design of experiments (DOE) to assess whether the values generated by the system can be computed by the machining equipment. After this validation, machining is performed on different parts of the specimen, using the data generated by the DOE. The analysis of the specimen includes an evaluation of the roughness to examine the surface characteristics and the surface quality resulting from the machining. This study contributes to the advancement in the understanding of the effects of tensile polishing on carbide milling cutters, providing valuable data on the surface quality of specific materials, such as SAE P20 steel. The results obtained demonstrate that the cutting edge treatment resulted in improvements of approximately 12%, but it was not the predominant factor for the surface quality of the machined material

Keywords: tools; drag polishing; surface quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fresamento.....	20
Figura 2 - Velocidades de corte e avanço, profundidade de corte e deslocamento radial	21
Figura 3 - Exemplo de fresas inteiriças	21
Figura 4 - Contorno de um gume arredondado.....	22
Figura 5 - Mudança geométrica após a preparação do gume	23
Figura 6 - Processos para tratamento do gume.....	24
Figura 7 - Efeito no tratamento do gume.....	24
Figura 8 - Escovas circulares de filamentos abrasivos	25
Figura 9 - Dinâmica do acabamento por arraste e foto da máquina utilizada	27
Figura 10 – Ação do acabamento por arraste na superfície de uma ferramenta revestida	27
Figura 11 – Desvios na superfície de uma peça	31
Figura 12 – Representação de ondulações e microirregularidades.....	32
Figura 13 – Rugosidade média Ra.....	32
Figura 14 – Perfil de análise da rugosidade RZ.....	33
Figura 15 – Perfis geométricos com mesmo valor de Ra	34
Figura 16 – Formas geométricas com mesma variação de Ra	34
Figura 17- Textura deixada na superfície após fresamento	36
Figura 18 – Fluxograma das etapas do trabalho	39
Figura 19 – Análise da rugosidade	40
Figura 20- Região de análise da rugosidade	41
Figura 21 – Material do corpo de prova	42
Figura 22 – Dados técnicos e montagem da ferramenta.....	42
Figura 23 – Cristais de diamante sintético.....	44
Figura 24- Análise geral da rugosidade Ra utilizando ferramentas com e sem polimento	46
Figura 25- Análise geral da rugosidade Rz utilizando ferramentas com e sem polimento	47
Figura 26- Análise geral da rugosidade Rmax utilizando ferramentas com e sem polimento	48
Figura 27 - Superfície de resposta e curvas de níveis com utilização de ferramenta polida. ...	50
Figura 28- Superfície de resposta e curva de nível ferramenta sem polimento.....	51
Figura 29- Curvas de níveis para fresa com polimento do gume	53
Figura 30- curvas de níveis para fresa sem tratamento do gume.....	55
Figura 31 - Textura para Vc 80 (m/min)	56
Figura 32 - Textura para Vc 100 (m/min)	57

Figura 33 - Textura para Vc 120 (m/min)	57
Figura 34 - Gráfico de Cook's	58
Figura 35 - Gráfico de Pareto	61
Figura 36 - Análise microscópica da ferramenta após o fresamento	62
Figura 37 - Desgaste frontal e flanco do gume de corte	63
Figura 38 – Máquina de acabamento por arraste em mídia abrasiva	71
Figura 39 – Centro de Usinagem ROMI	71
Figura 40 – Rugosímetro SJ-201 utilizado nos ensaios	72
Figura 41 – Corpo de prova	72
Figura 42 – Desgaste ocorrido na fresa com tratamento do gume	72
Figura 43 – Fixação do corpo de prova	73
Figura 44 - Fresadora convencional utilizada para fixar o rugosímetro.	73
Figura 45- Superfície de resposta e curvas de níveis para padrão de rugosidades Rz	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimento de amostragem cut-off.....	40
Tabela 2 - Velocidades x Polimento e resultados de rugosidades (Ra, Rz e Rmax).	45
Tabela 3 - Análise geral dos fatores	59
Tabela 4 - Função Anova para valores de Ra	60
Tabela 5 - Fatores controláveis e rugosidades mensuradas	75
Tabela 6 - Valores das rugosidades mensuradas Ra, Rz e Rmax	76
Tabela 7 - Resultados anova para rugosidade Rz	77
Tabela 8 - Resultados anova para rugosidade Rmax	77

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
AT	Tratamento superficial por meio de polimento por arraste
DOE	Projeto de experimentos
OT	Configuração original de fabricação

LISTA DE SÍMBOLOS

α	nível de significância [%]
α	ângulo de folga [graus]
β	ângulo de cunha [graus]
a_e	profundidade de corte radial [mm]
a_p	profundidade de corte axial [mm]
f	avanço [mm]
f_z	avanço por gume [mm/gume]
L_c	comprimento de <i>cut-off</i> [μm]
L_e	comprimento unitário de medição [mm]
K	fator de forma
r	raio de gume
R_a	desvio médio aritmético de rugosidade [μm]
r_h	raio do cantiléver [mm]
R_{HA}	raio do planetário [mm]
R_{max}	profundidade máxima individual de rugosidade [μm]
R_q	desvio médio quadrático de rugosidade [μm]
R_z	média aritmética das rugosidades singulares [μm]
S	superfície da peça
S_γ	comprimento do arredondamento na face da ferramenta [μm]
S_α	comprimento do arredondamento no flanco da ferramenta [μm]
V_c	velocidade de corte [m/min]
V_e	velocidade de corte efetiva [m/min]
V_f	velocidade de avanço [m/min]
z_n	número de gumes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PROJETO DE PESQUISA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TEMA	16
1.3	OBJETIVO GERAL	17
1.3.1	Objetivos específicos.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	FRESAMENTO..... Erro! Indicador não definido.	18
2.1.1	Fresamento frontal e fresamento cilíndrico	19
2.2	GEOMETRIA DA FERRAMENTA	22
2.3	TRATAMENTO DO GUME	23
2.3.1	PROCESSO DE ESCOVAÇÃO COM CERDAS ABRASIVAS.....	25
2.3.2	Acabamento por arraste em meio abrasivo.....	26
2.4	QUALIDADE SUPERFICIAL.....	28
2.4.2	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	31
2.4.2.1	PARÂMETROS DA RUGOSIDADE.....	31
2.5	TEXTURA.....	35
2.6	INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DO GUME NA QUALIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA.....	36
2.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	37
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	ETAPAS DA METODOLOGIA.....	38
3.1.1	Planejamento experimental	39
3.1.2	Parâmetros de entrada	39
3.1.3	Avaliação dos dados de saída.....	40
3.2	MATERIAL DO CORPO DE PROVA.....	41
3.3	FERRAMENTAS.....	42
3.3.1	Polimento por arraste em meio abrasivo	43
3.4	EQUIPAMENTOS	43
4	RESULTADOS	44

4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MÍDIA UTILIZADA NO ACABAMENTO POR	
	ARRASTE.....	44
4.2	Análise da qualidade da superfície após a usinagem.....	44
4.3	Análise de rugosidade.....	45
4.4	Análise da textura	56
4.5	Projeto e análise de experimentos.	59
5	CONCLUSÕES	64
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	71
	APÊNDICE B – TABELAS UTILIZADAS	75

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é fundamental na fabricação de componentes essenciais, garantindo precisão e confiabilidade em itens que vão de talheres a estruturas complexas como aeronaves. A pesquisa em otimização de processos e ferramentas é crucial para maximizar a eficiência, a produtividade e a qualidade dos produtos.

A crescente demanda por produtos usinados exige alto desempenho, confiabilidade e durabilidade, impulsionando avanços em tecnologias, métodos de fabricação e materiais para ferramentas de usinagem, que devem ser resistentes a condições severas para assegurar a qualidade das peças.

M'Saoubi *et al.* (2008) destacam a importância da pesquisa na área, indicando que a busca por avanços tecnológicos na fabricação por usinagem é uma preocupação compartilhada pela comunidade acadêmica e industrial. Essa colaboração é essencial para impulsionar a inovação e garantir que a usinagem continue a desempenhar um papel vital na produção de componentes essenciais para nossa sociedade.

Conforme descrito por Mesquita (1992), a usinagem é um processo de fabricação comum utilizado na indústria para dar forma, acabamento e precisão a materiais brutos, muitas vezes por meio da remoção de material, sendo que sua finalidade principal é garantir uma superfície de acabamento que atenda às condições superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) necessárias para a aplicação específica da peça ou acessório fabricado.

Dessa forma, a usinagem não apenas molda a peça conforme as dimensões desejadas, mas também assegura que a superfície tenha a qualidade necessária para cumprir sua função de maneira eficiente e adequada. Essa abordagem leva em consideração tanto a aparência superficial quanto a integridade estrutural da peça, visando atender aos requisitos específicos do produto final.

A geometria e a preparação da ferramenta são fatores relevantes no desempenho das ferramentas de usinagens. Esses elementos influenciam diretamente a eficiência do processo de usinagem, a vida útil da ferramenta e a qualidade das peças produzidas (COELHO *et al.*, 2004; YUSSEFIAN *et al.*, 2010). A preparação do gume visa melhorar a estabilidade do corte, reduzindo assim lascas, trincas e fraturas e prolongar a vida útil da ferramenta (BIERMANN; TERWEY, 2008; KARPUSCHEWSKI; BYELYAYEV; MAIBORODA, 2009).

Defeitos de gume, como microfissuras, rebarbas e irregularidades, são comuns em ferramentas após fabricação e retificação. Esses problemas afetam a vida útil, confiabilidade e

qualidade das peças. O processamento do gume consiste em criar uma geometria de contorno específica e modificar a rugosidade e textura da superfície da ferramenta próxima à borda para melhorar sua performance (RODRÍGUEZ, 2009).

O estudo de Bouzakis *et al.* (2009) destaca que, ao obter um gume de ferramenta menos afiado, ou seja, mais arredondado, as tensões durante o processo de corte são distribuídas de maneira uniforme no gume de corte. Isso resulta na redução direta das tensões, promovendo um processo de corte mais estável. Além disso, materiais de elevada dureza podem demandar maior área de contato e menor pressão, sendo possível resolver esse desafio ao aumentar o raio de gume, conforme sugerido por Stępień (2010).

Segundo Rodríguez (2009), houve um aumento nas pesquisas sobre o tratamento do gume de ferramentas de corte na última década. Esse tratamento visa homogeneizar o contorno do gume, resultando em uma melhoria na microtopografia e contribuindo para a vida útil das ferramentas.

As ferramentas de corte são desenvolvidas com base em avanços em revestimentos, novos substratos, geometria aprimorada e tratamentos de gume. A preparação da borda permite uniformizar a região de corte, reduzindo aspectos indesejados (RODRÍGUEZ, 2009).

As inovações em ferramentas desempenham um papel crucial na melhoria dos processos de usinagem, abordando questões como materiais, geometrias de corte e análises das influências durante o processo (DAVIM, 2008).

A evolução das ferramentas, incluindo avanços em processos de preparação de gumes, é fundamental para melhorar a eficiência e a vida útil das ferramentas utilizadas na usinagem. A consideração de questões específicas, como a integridade superficial da peça usinada e da própria ferramenta, destaca a complexidade e a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nesse campo (DAVIM, 2008).

Ao explorar oportunidades para iterações e análises mais aprofundadas, é possível otimizar ainda mais o desempenho das ferramentas e, por consequência, melhorar a qualidade e a precisão dos processos de usinagem. A integridade superficial é um aspecto crucial, uma vez que afeta diretamente a qualidade do produto final, e avanços nessa área podem contribuir significativamente para o aprimoramento geral da usinagem (DAVIM, 2008).

Zeilmann *et al.* (2013) destacam melhorias significativas na eficiência de máquinas, reduzindo o período de improdutividade para cerca de 20%. Isso é atribuído principalmente à minimização de paradas causadas por quebras ou desgastes das ferramentas. Em uma linha semelhante, Xu *et al.* (2016) indicam que melhorias na eficiência de corte em 20% resultam em

uma redução de 15% nos custos de fabricação do produto. Esses estudos sugerem que otimizações operacionais e tecnológicas podem ter um impacto positivo tanto na produtividade quanto nos custos na indústria.

A qualidade superficial resultante do processo de usinagem pode ser identificada através da análise da topografia de superfície, bem como do estado mecânico, metalúrgico e químico do material. Essa caracterização estabelece uma sólida base física para compreender a compatibilidade, resistência à fadiga, resistência à corrosão e fricção de peças usinadas, como discutido por Reddy *et al.* (2008) e Sun e Guo (2009).

A qualidade da superfície resultante do processo de usinagem tem um impacto significativo no desempenho funcional de componentes usinados. Para garantir alta confiabilidade e resistência a falhas, especialmente relacionadas à fadiga, fluência e corrosão, é crucial exercer cuidado e controle na qualidade superficial. Essas falhas, frequentemente originadas próximas à superfície do material, estão diretamente vinculadas à qualidade superficial do material (JAWAHIR *et al.*, 2011; PU *et al.*, 2011; RAO *et al.*, 2011; DEVILLEZ *et al.*, 2011).

A qualidade da superfície usinada depende de fatores como acabamento, microestrutura, dureza e tensões residuais. Alterações comuns incluem superaquecimento, microtrincas e deformação plástica, influenciadas pelo material, parâmetros de usinagem e condição do gume da ferramenta.

Este estudo analisa qualitativamente a superfície usinada no fresamento de topo de aço P20, comparando fresas de metal duro com e sem preparação de gume por arraste em mídia abrasiva.

1.1 PROJETO DE PESQUISA

Análise quantitativa da qualidade superficial de um corpo de prova de aço P20, realizado através do processo de fresamento de topo com fresas inteiriças de metal duro, objetivando avaliar a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade da peça, com utilização de ferramentas com acabamento do gume pelo processo de arraste e ferramentas originais sem o polimento do gume.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A excelência superficial de uma peça ou acessório está intrinsecamente relacionada à sua funcionalidade, aplicação e custo de produção. Esses elementos desempenham um papel crucial para as empresas, permitindo a manutenção de lucros satisfatórios em suas operações a curto, médio e longo prazos (RYU; CHOI; CHU, 2006; HELLENO, 2004). Na indústria, aprimorar continuamente os processos de manufatura torna-se imperativo, resultando em acabamentos superficiais de qualidade excepcional. Isso é essencial para garantir ajustes precisos entre peças e componentes, especialmente em casos de deslizamentos mútuos, como buchas, rolamentos, guias lineares e hastes de pistões hidráulicos e pneumáticos. No entanto, é crucial também considerar a vida útil da ferramenta aplicada, conforme destacado por Santanna (2015) e Kaplan e Norton (1997).

Para que as empresas, especialmente no setor de manufatura, possam permanecer competitivas globalmente, é essencial que os tempos de processamento e fabricação de produtos sejam continuamente reduzidos, visando a maximização da lucratividade, como apontado por Hellenno (2004).

Embora a tecnologia empregada na fabricação de ferramentas seja amplamente reconhecida, alguns defeitos intrínsecos ao processo de fabricação são frequentemente observados, incluindo imperfeições, lascamentos e uma elevada rugosidade nos gumes das ferramentas, conforme indicado por Stępień (2010).

As primeiras pesquisas realizadas sobre a afiação de ferramentas foram relatadas por Fisher (1897). Nos últimos anos, tem havido uma crescente busca por pesquisas e métodos que visam aprimorar a preparação dos gumes de corte das ferramentas, com o objetivo de garantir a aplicação confiável das ferramentas (DENKANA; BIERMANN, 2014).

As irregularidades encontradas nas bordas das ferramentas de corte originam-se do processo de fabricação e afiação em si. Portanto, a preparação adequada da borda é fundamental para aprimorar a eficiência de corte das ferramentas, ao eliminar as inconsistências e promover a homogeneização (RODRÍGUEZ, 2009). Durante esse processo de preparação, a geometria da borda, inicialmente instável e sujeita a elevadas concentrações de tensão, é transformada em uma forma arredondada ou chanfrada, resultando na redução das tensões sobre a borda, conforme afirmado por Uhlmann *et al.* (2016).

De acordo com Bordin e Zeilmann (2014), é essencial avaliar as melhorias que o tratamento de uma geometria proporciona no processo de sua utilização. Os autores enfatizam

que uma preparação não uniforme pode resultar em esforços significativamente maiores na ferramenta, levando a tensões mais elevadas sobre ela.

Com base nas pesquisas já conduzidas por Ost (2016), Rodríguez (2009), Zanella (2018), Fernanda (2018) e outros autores, o presente estudo abordará o tratamento do gume das ferramentas através da técnica de arraste em mídia abrasiva. Esse método será aplicado em fresas de metal duro sem revestimentos. Avaliando a influência sobre o acabamento na qualidade superficial da peça usinada, diferenciando aos trabalhos citados anteriormente que analisaram a influência nas ferramentas de corte..

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é avaliar o efeito do tratamento de gume de uma fresa de metal duro sobre a qualidade superficial de uma peça específica fabricada em aço AISI P20.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a) investigar os procedimentos e técnicas envolvidos na preparação do gume de uma fresa de metal-duro utilizando o método de polimento por arraste;
- b) estabelecer os parâmetros operacionais do processo de usinagem, tais como: velocidade de corte, avanço de corte, profundidade de corte, polimento das ferramentas;
- c) avaliar a influência do polimento sobre as rugosidades R_a , R_z e R_{max}
- d) analisar a textura da peça usinada.

Ao cumprir esses objetivos específicos, o estudo visa contribuir para o entendimento aprofundado do processo de preparação do corte de uma fresa de metal duro e sua aplicação na usinagem de peças em aço AISI P20, com foco na qualidade superficial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o intuito de abordar todos os aspectos construtivos e normativos, a proposta deste trabalho será estruturada com base em fundamentos essenciais, utilizando a teoria já estabelecida e reconhecida. A organização está delineada em capítulos, a saber: Capítulo 2 –

Fundamentação teórica; Capítulo 3 – Metodologias para alcançar os objetivos propostos, com descrição dos materiais e métodos empregados na experimentação prática; Capítulo 4 – Apresentação dos resultados obtidos na experimentação; e, por fim, Capítulo 5 – Considerações finais, com uma análise comparativa entre os resultados alcançados e a teoria, além de sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FRESAMENTO

O fresamento é definido como um procedimento no qual uma ferramenta, constituída por um ou mais gumes de corte, realiza movimentos rotativos e de translação. Essa interação com a matéria-prima resulta na remoção intermitente de material, deixando diversas marcas de corte na superfície, conforme descrito por Stemmer (1995).

É uma operação de usinagem que utiliza uma ferramenta chamada fresa (DINIZ, 1999), a qual possui gumes cortantes simetricamente dispostos ao redor de um eixo.

Esse processo é amplamente reconhecido por sua versatilidade na fabricação de várias geometrias, assegurando elevadas taxas de remoção de material e garantindo medidas com tolerâncias apertadas (MACHADO *et al.* (2015).

O fresamento representa um método de usinagem produtivo que emprega movimentos de corte circulares. Ele frequentemente faz uso de uma ferramenta de múltiplos gumes, gerando múltiplos cavacos após uma revolução completa, e possibilita a criação de diversas superfícies, com formas e dimensões conforme as necessidades desejadas (DINIZ *et al.*, 1999; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Devido à natureza produtiva da ferramenta, que frequentemente apresenta múltiplos gumes de corte, a transposição de cortes interrompidos resulta em cargas térmicas e mecânicas alternadas na ferramenta, devido à sua complexidade. Para assegurar que a ferramenta seja capaz de lidar com variações estáticas e dinâmicas, é necessário realizar análises, conforme destacado por Paucksh *et al.* (2008).

A norma DIN 8580 (2003) define que as alterações na forma geométrica de um material durante um processo de corte são consideradas como usinagem. Os procedimentos de usinagem visam modificar a geometria, forma e características do material bruto para atingir um estado desejado, utilizando métodos de corte.

Atualmente, há uma variedade de opções e configurações de ferramentas amplamente difundidas e amplamente utilizadas. Exemplos incluem fresas sólidas de metal duro, fresas e cabeçotes intercambiáveis, bem como combinações de aço e metal duro, conforme mencionado por Fritz e Klocke (2018).

2.1.1 Fresamento frontal e fresamento cilíndrico

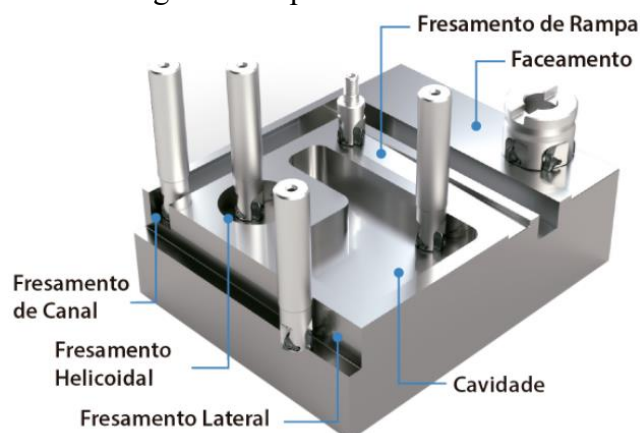
O fresamento frontal, também chamado de fresamento de face, é um método de usinagem em que a ferramenta de corte gira em torno de um eixo vertical alinhado com a superfície da peça. A ferramenta é posicionada perpendicular à direção de avanço, permitindo que a gume de corte entre em contato direto com a superfície da peça. Esse processo é frequentemente usado para remover material, criar superfícies planas ou cortar sulcos e chanfros. É aplicado em máquinas fresadoras, proporcionando um acabamento preciso e uma remoção eficiente de material. Vale destacar que o fresamento frontal é apenas uma das operações de fresamento, cada uma adequada para diferentes aplicações e resultados desejados (FERRARESI, 1969).

Conforme o processo de usinagem, é possível movimentar a superfície da peça em relação à ferramenta ou deslocar a ferramenta em relação à superfície da peça. Esses elementos estão relacionados ao ato de cortar ou desbastar o material. É fundamental que tanto a ferramenta quanto a peça alcancem velocidades de corte apropriadas para assegurar o máximo rendimento, como destacado por Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Stemmer (2005).

Os tipos de fresamento são descritos de acordo com as ferramentas e os processos que serão utilizados para obtenção do perfil desejado, processos de fresamento de topo (faceamento), circunferencial (cavidade, helicoidal), entre outras nomenclaturas (KÖNING; KLOCKE, 1997).

A Figura 1 apresenta alguns processos de fresamento.

Figura 1 - Tipos de fresamento



Fonte: adaptado de Kyocera (2022).

Segundo Weingaertner *et al.* (2004), o fresamento de topo é altamente versátil, sendo um dos métodos mais empregados devido à sua ampla aplicação na indústria. Ele permite a criação de diversas superfícies com formas livres.

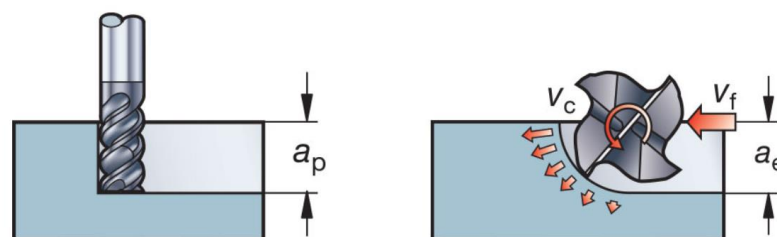
No sistema de fresamento, as ferramentas desempenham um papel crucial ao delimitar as operações. Entre essas ferramentas, as fresas de topo são amplamente utilizadas em diferentes processos de fresamento. Conforme a geometria dessas fresas, é possível realizar uma variedade de operações, como desbaste, faceamento, criação de ranhuras, cavidades, contornos, entre outras (KÖNING; KLOCKE, 1997).

Velocidade de corte refere-se a um ponto instantaneamente escolhido ao longo da borda da ferramenta durante o movimento de corte em relação à peça. No fresamento, esse movimento é determinado pela rotação da ferramenta. Assim, a velocidade de corte é tangencial e é representada como V_C (m/min). A velocidade de avanço é alcançada pela translação da ferramenta sobre a peça, seguindo uma trajetória radial em relação ao eixo da ferramenta, e é denotada por V_f (mm/min) (CHIAVERINI, 1996).

A penetração passiva, representada por A_p (mm), refere-se à profundidade em que a ferramenta penetra na peça durante um ciclo completo, sendo utilizada em diversas operações, como fresamento, torneamento, retificação, entre outras (STEMMER, 1995).

Na Figura 2 estão representadas a profundidade de corte, velocidade de corte, velocidade de avanço e deslocamento radial.

Figura 2 - Velocidades de corte e avanço, profundidade de corte e deslocamento radial



Fonte: adaptado de Kyocera (2022).

As fresas de topo destacam-se por sua geometria e pela disposição dos cortantes, os quais são formados tanto na periferia quanto na face da ferramenta. O número de cortantes pode variar de um único até vários (n), dependendo da aplicação específica. Entre as fresas mais comuns, estão aquelas que possuem dois ou quatro cortantes. Além da variação na quantidade de cortes, as fresas podem apresentar diferentes formas de ponta, como reta, semiesférica, toroidal e sólida (STEMMER, 2005). A Figura 3 apresenta alguns exemplos e modelos de fresas inteiriças de metal duro.

Figura 3 - Exemplo de fresas inteiriças



Fonte: adaptado de Kyocera (2022).

As fresas de metal duro são produzidas através do processo de sinterização de carbonetos e um agente ligante, frequentemente utilizando carbonetos de tungstênio e, comumente, cobalto como material de ligação. As proporções específicas de cada componente influenciam as propriedades e aplicações distintas de cada ferramenta. Após a sinterização, as fresas são retificadas para garantir a definição e precisão exigidas para o tipo de ferramenta, conforme descrito por Stemmer (2005).

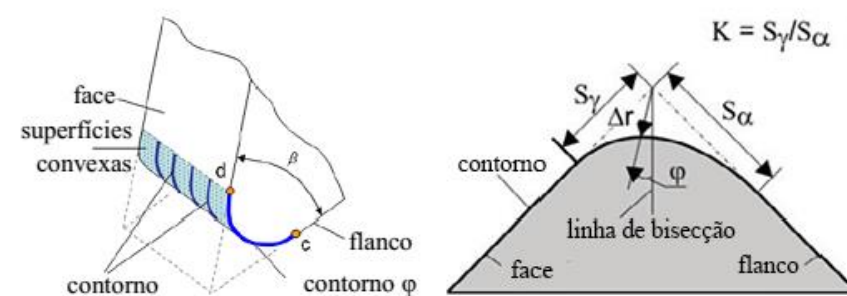
2.2 GEOMETRIA DA FERRAMENTA

As características fundamentais são incorporadas na concepção das ferramentas, em que a geometria do gume de corte exerce impacto direto nos parâmetros iniciais do processo de usinagem. Segundo as pesquisas de Rech (2006) e Rodríguez (2009), essa geometria pode ser categorizada em três escalas: micro, meso e macro.

Na macrogeometria, são definidos os ângulos de hélice, os raios de quina e o tipo de quebra-cavacos; a mesogeometria leva em conta os contornos dos gumes formados por meio dos processos de preparação do gume; enquanto a microgeometria se concentra no gume e nas superfícies (RODRÍGUEZ, 2009).

O fator de forma, designado pela letra K , é crucial na descrição do gume de corte em relação ao raio da ferramenta, esse parâmetro determina a orientação do gume de corte (AURICH; EFFGEN, 2015). Integrante da mesogeometria, o fator de forma resulta da divisão entre os segmentos de gumes S_γ e S_α (DENKENA *et al.*, 2012). Na Figura 4 está exemplificado o contorno de gume e o fator de forma K .

Figura 4 - Contorno de um gume arredondado

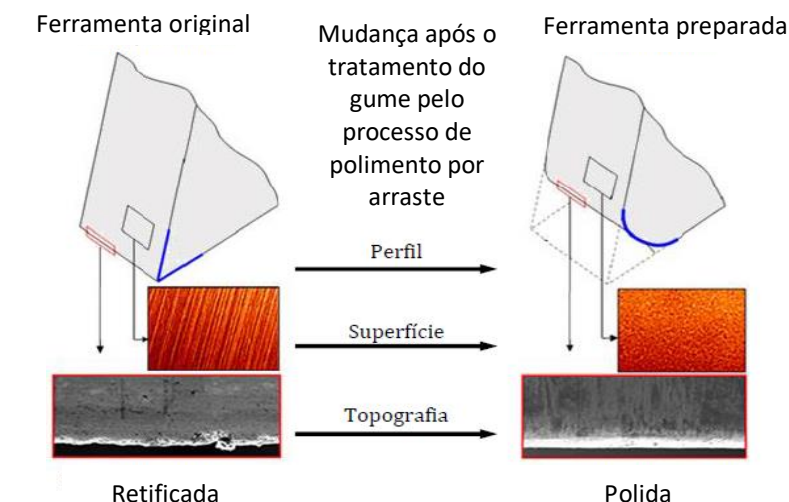


Fonte: adaptado de Rodríguez (2009) e Wyen, Knapp e Wegener (2012).

A alteração na configuração geométrica da borda original ocorre mediante a remoção de material do gume, resultando na criação de uma nova forma geométrica. Isso implica na transição de uma afiação plana para uma superfície que apresenta microrraios, conectando as faces de saída e folga da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009).

Conforme mencionado por Fritz e Klocke (2010), os defeitos provenientes da afiação do gume de corte são eliminados ou reduzidos durante o processo de preparação, resultando em melhor estabilidade e prolongamento da vida útil da ferramenta. Isso contribui para tornar o processo menos propenso a erros. A Figura 5 ilustra as mudanças oriundas após a preparação do gume.

Figura 5 - Mudança geométrica após a preparação do gume



Fonte: adaptado de Rodríguez (2009).

2.3 TRATAMENTO DO GUME

De acordo com Biermann e Terwey (2008) e Karpuschewski, Byelyayev e Maiboroda (2009), aprimorar a estabilidade durante o processo de corte ocorre mediante o preparo do gume. Esse procedimento envolve a remoção de imperfeições, a criação de uma geometria arredondada ou chanfrada na cunha de corte, fortalecendo-a, prolongando a vida útil da ferramenta e preparando a superfície para receber revestimentos.

As ferramentas de corte devem enfrentar altas cargas de trabalho. Para alcançar isso, a implementação de tecnologias avançadas e a otimização das estratégias de corte são essenciais. Essas abordagens viabilizam condições ideais para extrair o potencial máximo de uma ferramenta, especialmente em termos de produtividade e qualidade (RODRÍGUEZ, 2009).

A qualidade obtida em uma superfície usinada é diretamente afetada pela forma e qualidade do gume empregado, conforme mencionado por Denkena *et al.* (2012). Essa consideração é essencial para garantir consistência na fabricação de ferramentas, atendendo às exigências elevadas de confiabilidade e produtividade na escala industrial (DENKENA; BIERMANN, 2014).

Na figura 6 abaixo, apresentado alguns dos processos de preparação de superfície nas condições de fatores mecânicos, térmicos e químicos, utilizados industrialmente para diversos aplicação, Rodriguez (2009)

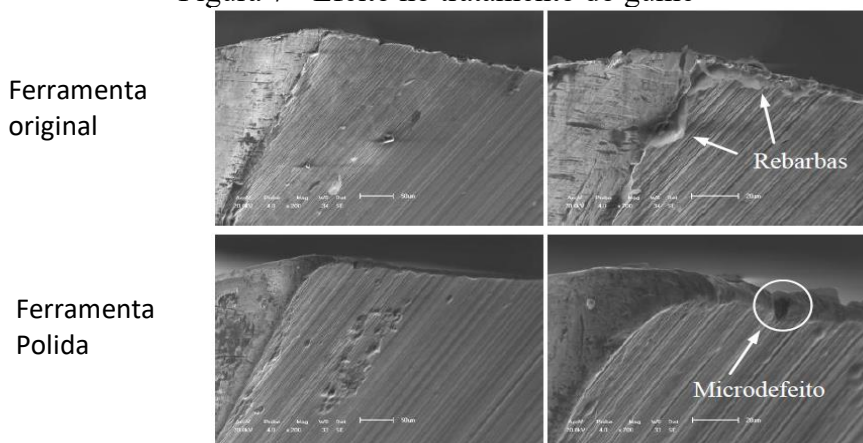
Figura 6 - Processos para tratamento do gume



Fonte: adaptado de Rodríguez (2009).

Os procedimentos de afiação têm a capacidade de modificar a superfície e as tensões residuais no substrato, aprimorando a rugosidade resultante do processo de retificação da ferramenta, bem como das saliências e incrustações provenientes do revestimento. Em um estudo conduzido por Zeilmann et al. (2012), foi observado um aumento no desempenho da ferramenta após a aplicação dos tratamentos de afiação. Esses procedimentos resultaram em uma redução significativa de fissuras na borda da ferramenta. Esses efeitos estão resumidos na Figura 7.

Figura 7 - Efeito no tratamento do gume



Fonte: adaptado de Zeilmann *et al.* (2012). b

Uma abordagem para aprimorar o tratamento do gume envolve a regularização da superfície, eliminando de maneira sistemática excessos de material e criando uma geometria

específica. Essa abordagem pode alterar a textura e a rugosidade da microtopografia nas proximidades do gume da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009).

A categorização da ferramenta está vinculada aos procedimentos industriais utilizados na fabricação de ferramentas. Sem tratamentos especiais, os gumes apresentam raios de aproximadamente $5\mu\text{m}$ após afiação com retíficas. Quando submetidas a processos como jateamento abrasivo ou acabamento por arraste, esses raios variam em média de 5 a $20\mu\text{m}$. Por último, ferramentas produzidas por escovação têm raios superiores a $20\mu\text{m}$, conforme indicado por Paucksh *et al.* (2008) e Sommer (2013).

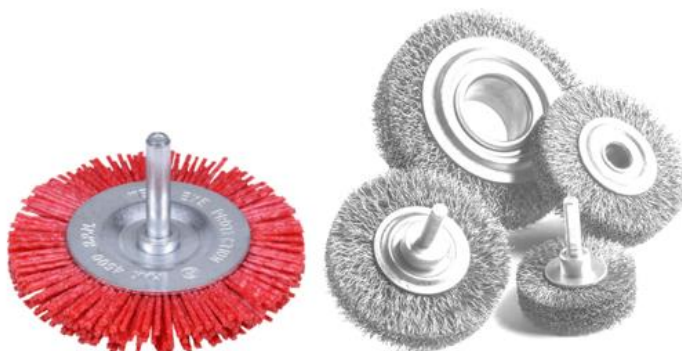
Diversos pesquisadores investigaram as alterações e impactos da geometria do gume de corte na integridade superficial da peça, incluindo estudos de Biermann e Terwey (2008), Rodríguez (2009), Zeilmann *et al.* (2012), Yamaguchi *et al.* (2012), Bordin (2013) e Ost (2016).

2.3.1 PROCESSO DE ESCOVAÇÃO COM CERDAS ABRASIVAS

A utilização de escovação com cerdas abrasivas é amplamente difundida na indústria devido aos seus custos acessíveis e diversas aplicações, mesmo em processos de usinagem com geometria não definida. Essa técnica é empregada para várias finalidades, desde a remoção de material até a obtenção de acabamentos superficiais. Além disso, é comumente aplicada em ferramentas de usinagem destinadas à preparação de gumes (DENKENA, 2012).

As escovas circulares, também conhecidas como FAN, são discos circulares compostos por filamentos de *nylon* impregnados com material abrasivo. Entre os materiais abrasivos comumente utilizados, destacam-se o óxido de alumínio (Al_2O_3), carboneto de silício (SiC), nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante policristalino (PCD). A escolha do material abrasivo depende do tamanho dos grãos ou da granulometria utilizada. As escovas abrasivas, classificadas conforme apresentado por Bassett, Köhler e Denkena (2012), são ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Escovas circulares de filamentos abrasivos



Fonte: adaptado de Ropan (2024).

A técnica de escovação com discos abrasivos é empregada globalmente por fabricantes de ferramentas. Além de criar microgeometrias nas bordas das ferramentas, essa abordagem contribui para a diminuição da rugosidade, facilitando o fluxo dos cavacos. Essa técnica pode ser aplicada em uma variedade de formas e tamanhos de ferramentas. Contudo, para alcançar uma geometria desejada em larga escala industrial, são necessários equipamentos e tecnologia bem definidos (TIKAL, 2009).

Embora amplamente empregado, o processo demanda atenção e análise, especialmente no que diz respeito ao desgaste dos filamentos. Sem um controle adequado desse elemento, torna-se inviável manter as geometrias e tolerâncias conforme desejado (PAUCKSH *et al.*, 2008).

A utilização de escovas abrasivas está condicionada ao controle preciso da temperatura durante o processo, visando evitar a fusão do filamento e a consequente deposição de óxidos indesejados na superfície escovada, conforme apontado por Basset, Köhler e Denkena (2012), com a faixa crítica de fusão situando-se entre 210 e 225°C. Em ambientes industriais, a regulação térmica é alcançada mediante a aplicação de fluidos refrigerantes, cujo propósito é preservar os filamentos, prevenindo o desgaste excessivo, e assegurar de maneira uniforme o acabamento da superfície trabalhada. Esses fluidos são cuidadosamente selecionados para serem compatíveis com os filamentos, evitando assim qualquer degradação ou contaminação (FRITZ; KLOCKE, 2010).

A aplicação de escovas abrasivas no processo de preparação do gume é influenciada por diversos fatores essenciais, como a forma e ângulo de contato, pressão, profundidade de corte e tempo de atuação (BASSET; KÖHLER; DENKENA, 2012). Conforme destacado por Fritz e Klocke (2010). Várias pesquisas foram conduzidas para atenuar esse processo, resultando frequentemente em geometrias arredondadas com raios superiores a 20µm.

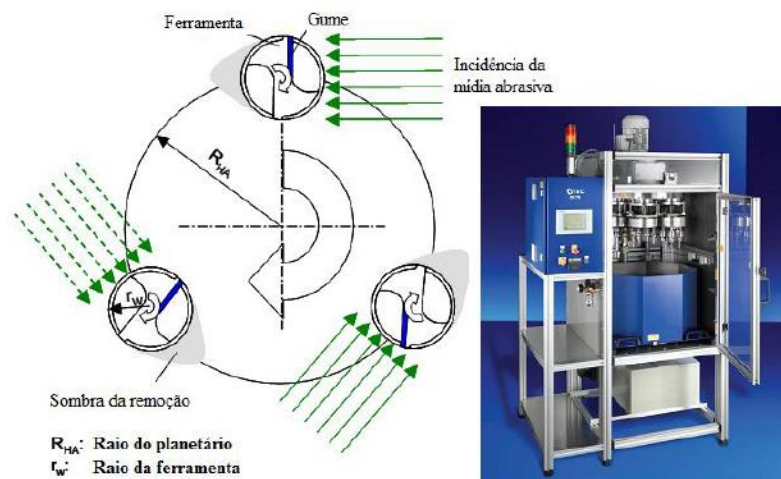
2.3.2 Acabamento por arraste em meio abrasivo

No acabamento por arraste em meio abrasivo, a peça ou ferramenta é submersa em uma mídia abrasiva escolhida conforme o tipo de acabamento desejado e a granulometria adequada. Nesse processo, conhecido também como acabamento por deslizamento, a peça realiza movimentos de rotação e translação enquanto ocorre abrasão pelos grãos da mídia (OTEC, 2008)

A movimentação e rotação das ferramentas no ambiente abrasivo são realizadas pelo sistema planetário do equipamento. Enquanto a ferramenta gira em torno de seu eixo central, o

cabeçote ao qual estão fixadas desloca-se ao longo do eixo central da máquina. Esse processo garante uniformidade em todas as regiões da ferramenta que estão imersas no meio abrasivo (RISSE, 2006; OTEC, 2008). A Figura 9 ilustra os movimentos de rotação e translação realizados nesse processo de acabamento por arraste.

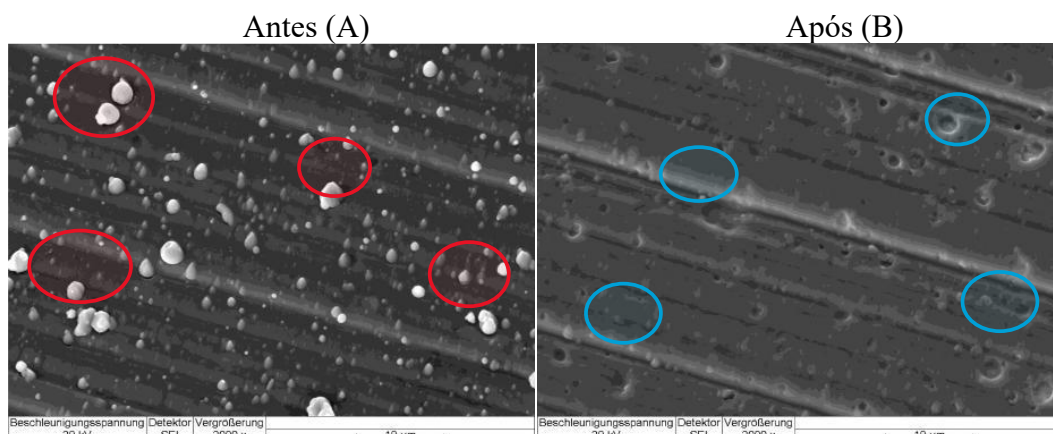
Figura 9 - Dinâmica do acabamento por arraste e foto da máquina utilizada



Fonte: adaptado de Bordin (2006).

Em materiais com superfícies revestidas, a retificação por arraste configura-se como um procedimento eficaz para a remoção de partículas residuais aderidas durante etapas anteriores do processo produtivo. Segundo Bordin (2006), essa técnica atua diretamente sobre as irregularidades iniciais da superfície, promovendo um nivelamento por abrasão que resulta em um acabamento mais uniforme e controlado, além de favorecer a adesão de camadas posteriores ou melhorar o desempenho funcional da peça exemplo deste demonstrado abaixo na Figura 10.

Figura 10 – Ação do acabamento por arraste na superfície de uma ferramenta revestida



Fonte: adaptado de Bordin (2013).

Na Figura 10(a), os materiais de revestimento estão notavelmente destacados em vermelho, indicando o acúmulo na superfície da ferramenta. Na Figura 10(b), as regiões delineadas em azul destacam locais onde os acúmulos foram removidos por meio do processo de acabamento por arraste, conforme descrito por Bordin (2006).

O método de acabamento por arraste está se tornando cada vez mais essencial nas operações e instalações industriais de manufatura. Suas aplicações abrangem desde o polimento de componentes do corpo humano, como próteses de joelho, até a melhoria da superfície de engrenagens de alto desempenho utilizadas em carros de Fórmula 1, além de ser empregado nos processos de fabricação de ferramentas de corte. A escolha desse método é respaldada pela sua confiabilidade e capacidade de reprodução precisa (TIKAL, 2009).

2.4 QUALIDADE SUPERFICIAL

A aparência externa de uma peça produzida através do método convencional de usinagem ocorre pela interação entre avanço, velocidade de corte e preparação do gume. A qualidade superficial resultante é avaliada considerando especialmente a preparação do gume. Ao analisar as superfícies usinadas utilizando microscopia, é possível identificar detalhes nas regiões com diferentes planicidades. Portanto, a rugosidade de um componente é definida com base nesses detalhes, mesmo que a peça pareça perfeita quando observada macroscopicamente (KÖNING; KLOCKE, 1997).

Assim, a excelência superficial de um componente usinado está diretamente associada aos efeitos de deformações plásticas, recuperação elástica, ruptura, calor, tensões residuais e, inclusive, reações químicas. Esses fatores podem se manifestar de modo variado numa superfície recém trabalhada, como indicado por Machado *et al.* (2009). É crucial considerar critérios de entrada, tais como parâmetros de corte e geometria da ferramenta, os quais desempenham papel fundamental na determinação da qualidade superficial (KÖNING; KLOCKE, 1997),

A qualidade superficial é um padrão rigorosamente técnico, originado das condições inertes e aprimoradas, que resultam nas superfícies, seja por meio de usinagem ou outros métodos de criação de superfície. A avaliação da integridade superficial está intrinsecamente ligada à qualidade da superfície usinada, podendo impactar significativamente a funcionalidade de um elemento, especialmente quando exposto a esforços térmicos e mecânicos (FIELD, 1973).

As modificações na superfície de um material podem ser agrupadas em cinco categorias distintas: propriedades químicas, metalúrgicas, elétricas, térmicas e mecânicas. A usinagem desempenha um papel crucial na alteração dessas características, influenciando a topografia, como textura, ondulações e rugosidade, as propriedades mecânicas, incluindo tensões residuais e dureza, e ainda a microestrutura, a transformação de fase, o tamanho e a geometria do grão, inclusões, entre outros (OZTEL; ULUTAN, 2011; FIELD, 1973; DEONISIO, 2004).

As superfícies resultantes do processo de usinagem são sujeitas a forças mecânicas e térmicas que podem modificar as propriedades da superfície e subsuperfície do material. A caracterização dessas superfícies é determinada por suas irregularidades geométricas, variações termomecânicas, microestruturais e deformações plásticas, conforme discutido por Che-Haron e Jawaid (2005) e por Wyatt e Berry (2006).

As imperfeições presentes na superfície do material podem resultar em complicações futuras na funcionalidade, prejudicando a durabilidade do objeto processado. Por exemplo, a resistência à falha de um componente está intimamente relacionada à sua qualidade superficial, como destacado por Schwach e Guo (2006) e Seemikeri *et al.* (2008).

Diversos estudos indicam que a geometria do raio ou chanfro no gume de corte de uma ferramenta pode impactar a mecânica da operação de corte, provocando variações nos níveis de temperatura, na qualidade da superfície, na vida útil da ferramenta, nas forças aplicadas durante o corte e no desgaste da ferramenta (BOUZAKIS *et al.*, 2003; FAN; WU, 2005; RODRÍGUEZ, 2009; CHEUNG *et al.*, 2008).

As modificações na camada superficial durante operações de usinagem e as alterações nas propriedades dos materiais destacam a integridade do material, bem como a eficiência da superfície em aplicações, especialmente em componentes sujeitos a tensões estáticas e dinâmicas elevadas (JAVIDI *et al.*, 2008).

Quando as camadas superficiais entram em contato direto com as cargas de trabalho, as falhas por trincas têm a tendência de iniciar na superfície do material e se espalhar por meio dele. Portanto, é crucial realizar um controle de qualidade superficial durante o processo de usinagem (JAVIDI *et al.*, 2008).

A capacidade de usinagem de um material pode ser avaliada por meio da sua qualidade superficial, sendo as deformações plásticas e elásticas deixadas no material pelo gume de corte da ferramenta um dos fatores mais relevantes nesse contexto, conforme destacado por Fritz e Klocke (2010).

A baixas velocidades de corte e em situações em que diferentes combinações de ferramenta e material usinado estão presentes, ocorre o fenômeno conhecido como crescimento de borda. Esse fenômeno manifesta-se pela adesão de partículas de material na face de saída da ferramenta. Devido às tensões térmicas e mecânicas geradas durante o processo de corte, há remoção esporádica do material que compõe a face de saída da ferramenta para a superfície da peça de trabalho (FRITZ; KLOCKE, 2010).

As arestas postiças, são indesejáveis devido ao aumento do desgaste da ferramenta, o que impede a obtenção da qualidade superficial desejada. No entanto, em altas velocidades de corte, esse fator torna-se menos significativo, como observado por Machado *et al.* (2011).

Para que o procedimento de corte seja otimizado, é crucial estabelecer uma profundidade mínima de corte para cada especificação de ferramenta, o que visa assegurar a formação adequada do cavaco. No entanto, sempre que a profundidade estiver além do parâmetro estabelecido, o material sofre deformação elástica pela borda de corte. Vale ressaltar que o ponto de escoamento pode ser um dos fatores determinantes para o comportamento elástico do material durante o processo de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011).

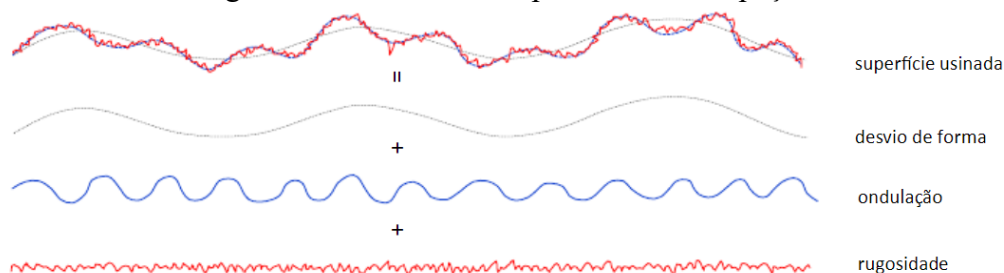
Na esfera da usinagem, os materiais são sujeitos a diversos fatores, como deformações plásticas, vibrações, fontes de calor, rupturas e tensões residuais. O conceito de qualidade superficial é utilizado para avaliar ou mensurar as camadas superficiais e internas do material após o procedimento de usinagem (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

A classificação dos desvios na superfície do material é designada como desvio de forma, dividida em seis classes, ordenadas de mais grosseiras a mais finas. No entanto, é crucial adotar uma abordagem extremamente conservadora ao escolher o segmento que será analisado quanto à qualidade da superfície, conforme indicado por Köning e Klocke (1997). As classes são:

- a) 1ª ordem: Desvio de forma;
- b) 2ª ordem: Ondulações;
- c) 3ª ordem: Ranhuras;
- d) 4ª ordem: Picos e vales;
- e) 5ª ordem: Estrutura do material;
- f) 6ª ordem: Estrutura reticulada do material.

Na Figura 11 consta a representação esquemática dos elementos de 1ª a 4ª ordens agrupados.

Figura 11 – Desvios na superfície de uma peça



Fonte: adaptado de Josso, et. Al., (2002).

A avaliação da qualidade superficial por meio da rugosidade emprega os elementos de 3ª, 4ª e 5ª ordem. No entanto, ocorre ocasionalmente a sobreposição dessas ordens de efeito. Para determinar essa qualidade, um apalpador mecânico é empregado. Esse dispositivo consiste em uma ponteira que desliza sobre a superfície desejada, sendo controlado por um comprimento de amostragem denominado *cut-off* (NICOLA, 2008).

2.4.1 RELAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL COM AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO FRESAMENTO

Segundo Machado (2011), as variáveis de entrada desempenham um papel crucial na obtenção de uma superfície desejada durante o processo de fresamento. Nesse contexto, o avanço, a profundidade de corte e a geometria da ferramenta emergem como fatores determinantes para a qualidade dessa superfície. Destaca-se, especialmente, o avanço, pois é ele quem influencia as alturas dos picos e vales deixados na peça, e essas marcas alternam-se de maneira quadrática.

2.4.2 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Os dispositivos empregados na avaliação da rugosidade superficial podem variar entre ópticos, mecânicos por contato ou a *laser*. A orientação apropriada para a utilização de cada instrumento pode ser encontrada nas diretrizes estabelecidas pela norma ASME B46.1 de 2002.

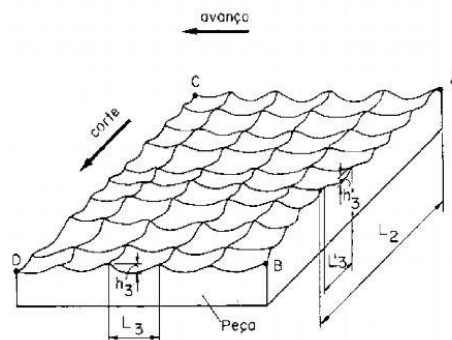
2.4.2.1 PARÂMETROS DA RUGOSIDADE

Em projetos de engenharia, as normas ISO-2632 e DIN 4766 são aplicáveis para tratar das características superficiais, ajustes de vedações, interferências e dinâmica de elementos em

conjuntos. A norma ISO-2632 aborda especificamente esses aspectos, enquanto a DIN 4766 lida com os valores de rugosidades provenientes de processos de usinagem.

A rugosidade superficial, categorizada por Ferraresi (1970), refere-se a microirregularidades tanto transversais quanto longitudinais. Irregularidades transversais seguem a direção do avanço da ferramenta, enquanto as longitudinais ocorrem na direção do movimento de corte, representadas na Figura 12.

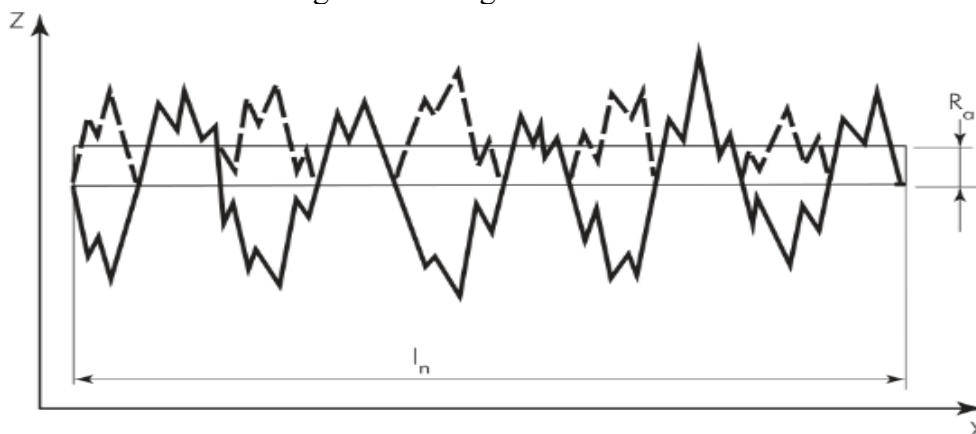
Figura 12 – Representação de ondulações e microirregularidades



Fonte: Ferraresi (1970).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio de sua norma NBR ISO 4287 (2002), descreve que os parâmetros da rugosidade média (R_a) são determinados pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas em relação à linha média do comprimento de amostragem. Esse método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade na medição e é demonstrado na Figura 13 abaixo.

Figura 13 – Rugosidade média R_a



Fonte: Novaski (1994)

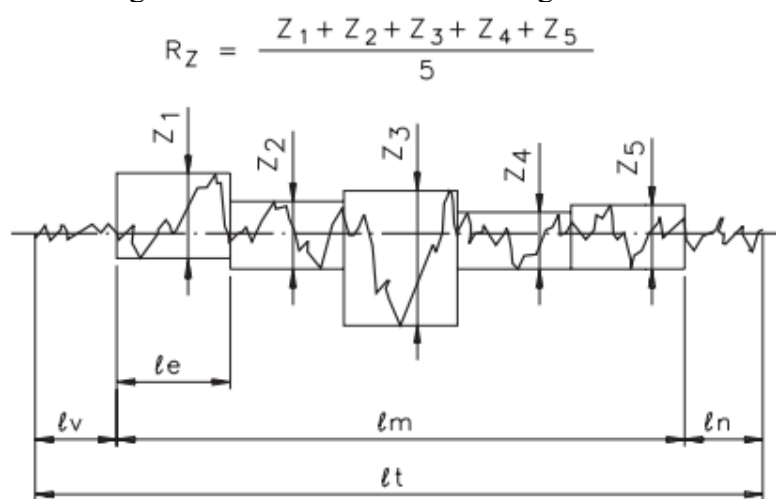
Sendo:

R_a = Rugosidade média;

ln = comprimento de amostragem.

Segundo Novaski (1994), a rugosidade média, definida pelo padrão R_z , é calculada como a média aritmética de cinco valores de rugosidade parcial. Esse cálculo envolve a soma dos valores absolutos dos pontos mais distantes acima e abaixo da linha média, abrangendo os valores do pico máximo e do vale mínimo presentes no comprimento de corte, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Perfil de análise da rugosidade R_z



Fonte: Novaski (1994).

Sendo:

R_z = Rugosidade média entre os picos e vales;

l_t = comprimento total de amostragem;

l_v = Ajuste inicial;

l_n = Ajuste final;

l_m = comprimento de avaliação;

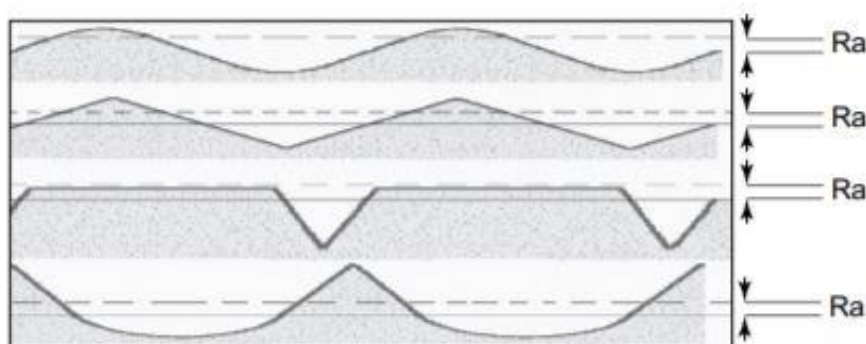
l_e = Blocos de amostragem;

Médias internas de amostragem = Z (1,2,3,4 e 5).

Analisar o perfil geométrico do acabamento superficial apenas com o padrão R_a ou R_z não é adequado em situações que demandam a compreensão precisa das alturas máximas de rugosidades, nestes casos é empregado o padrão R_{max} que avalia as distâncias totais entre os vales mais fundos e os picos mais altos dentro de um perfil de rugosidade medido no decorrer de uma amostragem exemplo deste está representado anteriormente na figura 14 sendo os valores compreendidos no 3º cut-off de amostragem Z_3 . Este parâmetro é fundamental em

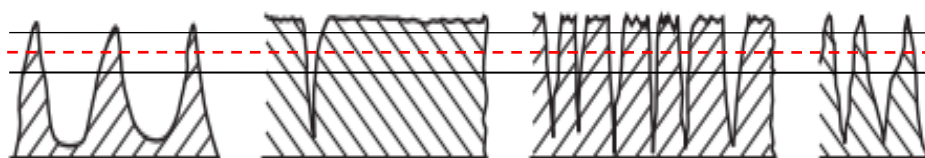
aplicações industriais, tais como: rolamentos, vedantes e superfícies de atrito. Conforme sugerido por Machado *et al.* (2011). As Figuras 15 e 16 apresentam alguns perfis geométricos com a mesma variação média de rugosidades.

Figura 15 – Perfis geométricos com mesmo valor de R_a



Fonte: Cardoso e Falco (2007).

Figura 16 – Formas geométricas com mesma variação de R_a



Fonte: adaptado de Mitutoyo SJS-201.

Na transformação do cavaco, não ocorre cisalhamento do material para formar o cavaco na região de menor espessura ($h/\min$). Em vez disso, observa-se uma deformação elastoplástica que varia de acordo com o tipo de arredondamento do gume. A análise cuidadosa do tipo de preparação do gume é essencial, enquanto a rugosidade superficial é afetada pelo desgaste da ferramenta, raio de quina e sua preparação (BIERMANN, 2012; DENKANA; KOEHLER; REHE, 2012).

Segundo Zeilmann *et al.* (2013), ao analisar as propriedades da subsuperfície do material, observou-se que as ferramentas que passaram por tratamento de gume apresentaram uma camada afetada menor. Isso ocorreu devido a uma distribuição mais eficiente dos esforços de corte, resultando em índices reduzidos de atrito e calor e, consequentemente, menores deformações plásticas.

Existem análises qualitativas da geometria produzida, concentrando-se na estética do material avaliada diretamente. Nessa configuração, não são medidos valores de rugosidade, mas

sim a qualidade visual da superfície percebida a olho nu (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015).

O progresso do corte, quando combinado com o arredondamento do gume de uma ferramenta durante operações de faceamento, pode resultar em marcas superficiais na peça. A intensidade dessas marcas depende da interação entre fatores como valores de avanço e raios de quina. Avanços menores e quinas mais largas têm o efeito de reduzir a rugosidade superficial. Por outro lado, uma taxa de avanço de corte mais alta leva a uma espessura maior do cavaco não deformado (h_{min}), resultando em um volume de material removido relativamente maior. No entanto, essa abordagem pode gerar fricção na superfície, resultando em marcas pronunciadas e, por vezes, rebarbas, o que aumenta a rugosidade da superfície (REHE, 2012; GROVE; DENKENA, 2017).

No processo de fresamento, a qualidade da superfície está vinculada aos parâmetros de avanço da ferramenta, profundidade de corte e ao raio da ponta ou ao perfil do gume. Esses fatores interagem na peça, causando ondulações cujas alturas são medidas para determinar a qualidade superficial. Ferramentas com gumes arredondados de maneira otimizada e a execução adequada dos processos de corte resultam em acabamentos superficiais aprimorados (MACHADO; ABRÃO; COELHO, 2015; FRACARO, 2017).

2.5 TEXTURA

Geralmente caracterizada pela orientação e pelo número de picos e vales presentes na superfície, a textura é avaliada com base em sua forma, ondulações e rugosidade. Para uma avaliação quantitativa, são empregados parâmetros verticais aos picos e vales, sendo esses comprimentos de análise denominados *cut-off* (TABENKIN, 1999).

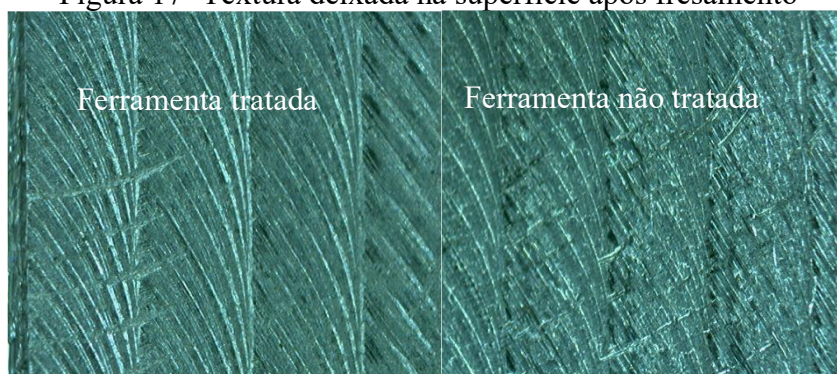
A textura é resultante dos desvios randômicos e da repetibilidade da superfície real em comparação com uma superfície geométrica. A direção na qual a ferramenta atuou sobre a superfície do material torna-se claramente definida com o surgimento de sulcos, que são marcas predominantes em processos de usinagem, como destacado por Bet (1999).

Durante o processo de fresamento de topo descrito por Zeilmann *et al.* (2013), enquanto usinavam aço classificado como ABNT P20, empregando fresas de metal duro preparadas através do processo de polimento por cerdas abrasivas, os pesquisadores observaram que a integridade superficial não apresentava variação estatística significativa, devido à dispersão dos valores. Os resultados indicaram que a textura do material usinado era notável e

distintiva. Ferramentas novas e não tratadas deixavam marcas bem definidas, enquanto aquelas com tratamento de gume deixavam marcas indefinidas na superfície.

Os autores também destacaram que a preparação da ferramenta resultava no aumento do raio de gume e da área de contato do gume com a superfície. Isso causava um rebaixamento das cristas deixadas durante a passagem da ferramenta de corte. Tais marcas podem ser observadas por meio de microscopia, fornecendo uma compreensão mais detalhada do efeito do tratamento superficial na usinagem do aço ABNT P20 (ZEILMANN *et al.*, 2013). A Figura 17 apresenta superfície gerada com ferramentas tratadas e não tratadas.

Figura 17- Textura deixada na superfície após fresamento



Fonte: Zeilmann *et al.* (2013).

2.6 INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DO GUME NA QUALIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA

Bouzakis *et al.* (2014) conduziram uma análise abrangente de diversos métodos de afiação no processo de fresamento a seco em diferentes materiais, como aço inoxidável 304L, ligas de Inconel 718, aço 42CrMo4 e Ti4Al6V. Utilizando abordagens como polimento magnético, acabamento por arraste, polimento com cerdas abrasivas, entre outros, os pesquisadores observaram que os resultados variam de maneira significativa em cada ferramenta e material. Em algumas circunstâncias, destacaram que tais métodos podem acelerar o desgaste da ferramenta, comprometendo sua vida útil.

As intervenções realizadas em uma ferramenta de corte têm efeitos imediatos na superfície produzida durante o processo de usinagem. Por exemplo, Denkena *et al.* (2012) investigaram que as tensões presentes na superfície de uma peça estão diretamente relacionadas ao raio do gume de corte, observando que raios menores resultam em tensões menores, enquanto raios maiores resultam em tensões mais elevadas, ambas de natureza compressiva.

A preparação do gume consiste na modificação intencional da geometria do gume de corte da ferramenta, geralmente por meio de processos como arredondamento, chanframento

ou polimento. Segundo Brinksmeier *et al.* (2006), essas modificações visam melhorar a estabilidade do corte, reduzir vibrações e prolongar a vida útil da ferramenta, impactando diretamente na qualidade superficial final da peça. Weinert *et al.* (2004) complementam que, ao se controlar o raio do gume de corte, é possível otimizar o equilíbrio entre resistência mecânica da ferramenta e agressividade do corte.

Davim (2008) destaca que a preparação do gume é especialmente relevante na usinagem de materiais de difícil usinabilidade, como superligas e aços temperados, onde a integridade superficial pode ser comprometida por tensões térmicas ou deformações plásticas. Estudos de Choudhury e El-Baradie (2000) indicam que, mesmo em materiais convencionais, o acabamento superficial pode ser significativamente alterado por pequenas variações na forma do gume.

Pesquisas recentes, como as de Günther e Biermann (2016), têm investigado a influência do gume em processos de microusinagem, onde o controle da preparação do gume se torna ainda mais crítico devido às escalas envolvidas. Já Hoogstrate e Kals (1993) mostraram que a durabilidade da ferramenta e a estabilidade do processo também estão diretamente relacionadas à forma do gume, confirmando a relevância da preparação do gume como estratégia técnica e econômica.

2.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) trata-se de uma abordagem estatística que, de forma afirmativa, permite avaliar as médias de uma população, com o intuito de identificar diferenças significativas entre elas. Além disso, verifica se fatores controláveis de entrada exercem influência nas variáveis dependentes. Para empregar essa técnica, é necessário que algumas premissas da análise sejam atendidas, a saber:

- a)** inexistência de dados discrepantes;
- b)** independência dos erros;
- c)** normalidade na distribuição dos erros;
- d)** manutenção da variância constante.

Sem realizar análises adicionais, como a análise de resíduos, a avaliação de dados discrepantes, a constatação de variância constante e a verificação da independência, torna-se desafiante compreender todas as pressuposições quando não se dispõe dos valores reais das

médias verdadeiras (μ_i) dos tratamentos, bem como dos erros (ξ_{ij}). Assim, torna-se imperativo conduzir um experimento para estimar tais médias, conforme indicado por Vieira (2006).

Esse procedimento de ANOVA pode ser visto como uma ampliação do teste t de Student, que compara apenas duas médias. Enquanto o teste t de Student é aplicável a dois grupos, o método de análise de variância permite a comparação de médias em situações mais abrangentes. Em casos específicos, como o exemplo de duas médias, é possível optar entre o teste t de Student e a análise de variância (VIEIRA, 2006).

Considerando que as médias e os tratamentos ocorram de maneira aleatória ou envolvam conjuntos distintos de dados, e para determinar até que ponto as médias dos tratamentos podem ser consideradas como evidência de diferença real, é possível empregar o método de análise de variância para identificar o limite, conforme proposto por Vieira (2006).

Com o objetivo de assegurar a autenticidade dos resultados obtidos, evitando meras coincidências, procede-se à análise dos resíduos. Tal análise visa avaliar a consistência dos resultados, identificando possíveis discrepâncias, erros, inversões de valores, digitações incorretas e resultados incompatíveis com o experimento, segundo indicado por Montgomery (2005).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas, de forma sistemática, as abordagens metodológicas adotadas para a condução dos ensaios experimentais. Serão detalhadas as características dos equipamentos, máquinas, materiais e ferramentas empregadas, bem como os parâmetros e dados de entrada considerados no desenvolvimento dos experimentos. Além disso, serão descritos os procedimentos operacionais adotados, abrangendo desde a preparação das amostras até a coleta e tratamento dos dados, com o intuito de assegurar a reprodutibilidade dos ensaios e a confiabilidade dos resultados obtidos. A análise crítica desses procedimentos visa fornecer subsídios técnicos para a interpretação dos dados experimentais.

3.1 ETAPAS DA METODOLOGIA

O processo metodológico adotado neste trabalho encontra-se representado no fluxograma da Figura 18, o qual oferece uma visão esquemática e organizada das etapas envolvidas na condução da pesquisa. Esse fluxograma permite compreender de forma sequencial e estruturada os procedimentos experimentais, desde a preparação dos corpos de

prova até a análise dos resultados obtidos. Cada fase será detalhada minuciosamente nas seções subsequentes, com ênfase nos critérios técnicos adotados, nos parâmetros operacionais utilizados, bem como nas ferramentas estatísticas aplicadas para validação dos dados e interpretação dos resultados.

Figura 18 – Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

3.1.1 Planejamento experimental

O planejamento experimental utilizado consiste na execução de testes de fresamento de topo, empregando ferramentas que apresentam duas características distintas: uma ferramenta na configuração original de fabricação (OT) e outra ferramenta submetida a tratamento superficial por meio de polimento por arraste (AT). Com o intuito de minimizar as variáveis durante os testes, optou-se por não utilizar fluido lubrificante. A escolha das interações de usinagens para manufaturar o corpo de prova, foram extraídas utilizando-se o software Designe Expert V13, assim definindo um design de experimentos (DOE).

3.1.2 Parâmetros de entrada

A avaliação do material ocorre no corpo de prova, com atenção especial à qualidade superficial da peça. Com o objetivo de minimizar as variáveis, foram definidos alguns parâmetros, entretanto foi utilizado valores dentro dos indicados pelo fabricante da ferramenta utilizada. A profundidade de corte (A_p) definida entre 0.1 e 0.5mm, assim como o avanço de corte (F_z) de 0.02 à 0.06 (mm/rot). A velocidade de corte (V_c) entre 80 e 120m/min e o tratamento da superfície da ferramenta foi alternado entre ferramentas polidas e não polidas.

Os testes de fresamento foram conduzidos em uma área retangular de 26,6mm de comprimento e 10,2 mm de largura, totalizando uma área de 297,92 mm². O deslocamento lateral (a_e) mantidos constante em 3mm, com uma estratégia de usinagem concordante durante todo o experimento.

3.1.3 Avaliação dos dados de saída

Como previamente explicado, as análises a seguir dizem respeito aos valores de rugosidades longitudinais, que foram realizadas nas superfícies dos corpos de prova. Cada superfície está associada a um padrão específico de dados de entrada. Os valores médios para cada rugosidade estão apresentados na Tabela 1. Para garantir a realização dos experimentos de maneira ideal, os valores do comprimento de amostragem *cut-off* foram estabelecidos de acordo com as especificações do equipamento mantendo-se o comprimento de 0,8mm x 5.

Tabela 1 - Comprimento de amostragem cut-off

TABELA DE COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM (CUT OFF)	
RUGOSIDADE RA (mm)	MÍNIMO COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM L (CUT OFF) (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

Fonte: adaptado de Mitutoyo SJS-201.

As variáveis de saída examinadas nos testes incluíram a qualidade superficial, avaliada por meio da análise da rugosidade, e a textura resultante na peça após o processo de fresamento analisadas de forma microscópica.

O método utilizado para o teste foi o de usinagem de área, no qual os parâmetros de textura e rugosidade, especificamente R_a , R_z e R_{max} , foram examinados. Foi adotado um critério de *cut-off* de 0,8mm x 5, com três medições realizadas em cada zona usinada. Os dados fornecidos para a comparação das superfícies são tanto quantitativos quanto qualitativos. A análise engloba a apresentação das texturas originadas inicialmente por ferramentas sem tratamento de corte e por ferramentas tratadas. A Figura 19 apresenta o equipamento utilizado, ao passo que a Figura 20, indica a posição da zona de medição de rugosidade em cada área designada.

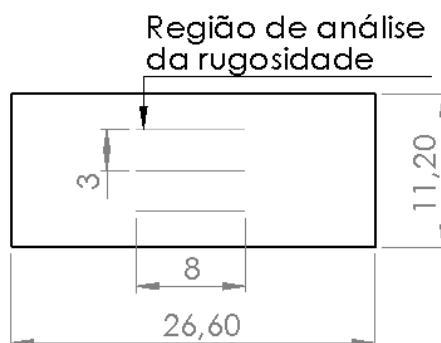
Figura 19 – Análise da rugosidade



Fonte: registrado pelo autor (2024).

As medições de rugosidade foram retiradas do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 20. Utilizou-se uma mesa com coordenadas milimétricas para realizar os movimentos de transposição do ponto mensurado, assegurando que, em todas as áreas de medição, o espaçamento entre uma tomada de medida e outra ocorresse de maneira padronizada.

Figura 20- Região de análise da rugosidade



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

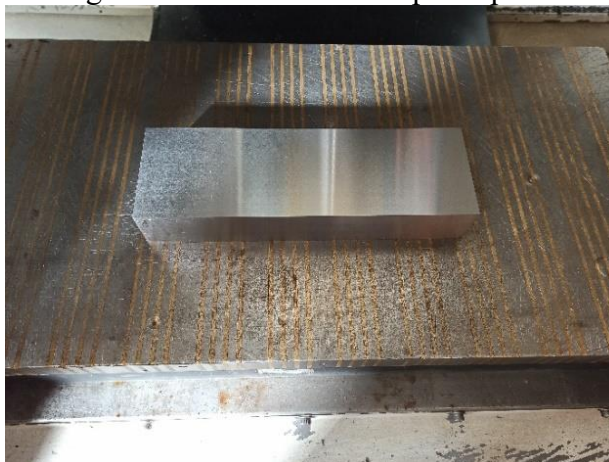
Empregou-se a técnica de análise de variância (ANOVA) para realizar a avaliação estatística dos resultados, com uma confiança de 95% e um nível de significância α de 5%. A análise e a criação dos gráficos foram conduzidas utilizando o *software* Design-Expert V13, além do suporte do Excel, para preencher os dados e realizar as médias dos valores mensurados.

3.2 MATERIAL DO CORPO DE PROVA

Para a elaboração do corpo de prova, optou-se pelo uso do aço AISI P20, uma escolha frequente na produção de moldes e matrizes, especialmente no setor de injeção polimérica, devido às suas excelentes propriedades de usinabilidade e à facilidade de espelhamento do material. Esse último é um fator crucial para facilitar o fluxo do polímero sobre as cavidades do molde.

O corpo de prova foi projetado com uma configuração retangular, exibindo dimensões de 252 x 80 x 57mm e uma dureza média de 36Hrc. Para garantir a planicidade e o alinhamento adequado durante a fixação e usinagem, três das suas faces foram retificadas. A fixação foi efetuada utilizando uma mesa magnética e a condição inicial do material antes do processo de usinagem pode ser observada na Figura 21. As demais fases do procedimento de fabricação encontram-se representadas nas figuras adicionais disponíveis no Apêndice A.

Figura 21 – Material do corpo de prova



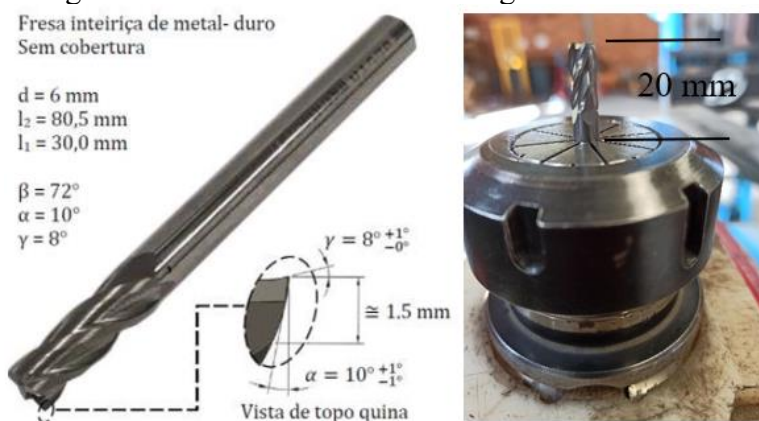
Fonte: registrado pelo autor (2024).

3.3 FERRAMENTAS

Foram disponibilizadas pela Universidade de Caxias do Sul fresas de metal duro paralelas da marca Seco Tools, apresentando um diâmetro nominal de 6mm, 4 gumes de corte, pertencentes à classe K40. Para a fixação, empregou-se um cone BT 40 com pinças Er-40, assegurando uma fixação eficaz e a estabilidade da ferramenta, conforme exemplificado no Apêndice A.

De acordo com o fabricante, as fresas utilizadas não têm cantos arredondados nem revestimento em sua produção inicial. Elas são caracterizadas por quatro gumes de corte, um ângulo de cunha (β) de 72° , um ângulo de incidência ou folga (α) de 10° , um ângulo de saída (γ) de 8° e uma inclinação da hélice de 30° . As especificações da ferramenta estão representadas na Figura 22.

Figura 22 – Dados técnicos e montagem da ferramenta



Fonte: adaptado de Buckell (2019), e autor (2024).

3.3.1 Polimento por arraste em meio abrasivo

O procedimento de polimento por arraste foi conduzido em colaboração com a empresa Secta Tools, situada na cidade de Caxias do Sul (RS). A mídia abrasiva empregada foi identificada como H4/400, fornecida pelo fabricante do equipamento de polimento e recomendada para operações de acabamento. Essa mídia é composta por grãos de cascas de nozes e pó de diamante, unidos por uma substância ligante. O processo ocorre de maneira contínua ao longo de um período de 10min, durante a interação entre a ferramenta e a mídia, com uma velocidade de rotação e translação constante de 40rpm.

3.4 EQUIPAMENTOS

A preparação do corpo de prova foi conduzida em colaboração com a empresa TechFor Brasil, localizada em Fagundes Varela (RS). A TechFor Brasil realizou ajustes no bloco, executando o esquadrejamento e a retificação em três faces do objeto.

A usinagem final do corpo de prova ocorreu na Engtech Usinagem, situada em Bento Gonçalves (RS), utilizando um centro de usinagem Romi modelo 760. O centro possui uma capacidade de usinagem de 760 x 440 x 500mm nos eixos x, y e z, uma rotação máxima do *spindle* de 7500rpm, conforme ilustrado no Apêndice A.

Para fixar o corpo de prova na máquina, foi utilizada uma mesa magnética permanente de 10.000kgf, garantindo uma fixação e planicidade ideais nas áreas de usinagem. Isso facilitou a colocação e retirada do bloco sem perder a referência, mantendo a estabilidade durante o processo de fixação (vide Apêndice A).

O polimento por arraste da ferramenta foi realizado pela empresa Secta Tools, utilizando a máquina modelo DF-3 Tool da marca OTEC. As imagens dos equipamentos utilizados também estão disponíveis no Apêndice A.

No Laboratório de Novas Tecnologias (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul, foi utilizado um rugosímetro portátil modelo SJ-301 da Mitutoyo, com resoluções de 0,01 μ m, juntamente com um apalpador mecânico com diamante de 5 μ m na ponta. As imagens da textura foram capturadas por meio de um estereoscópio trinocular modelo TNE-10B da marca Entex. As imagens dos equipamentos constam no Apêndice A.

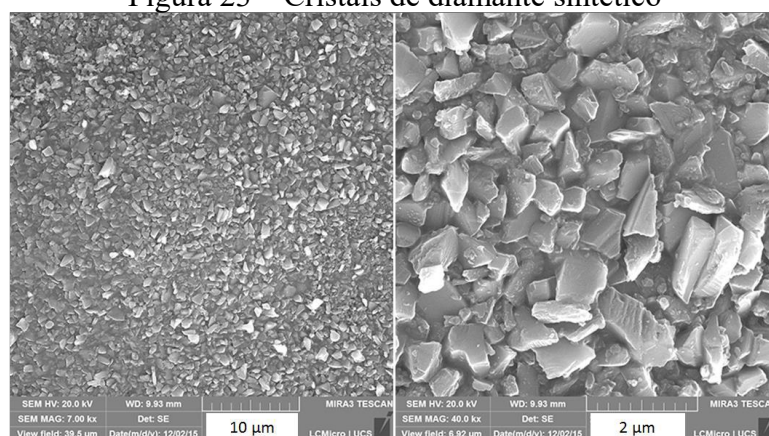
4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos no processo de fresamento de topo, com ênfase na avaliação da qualidade superficial, textura e na análise estatística dos dados. Os ensaios foram realizados utilizando ferramentas com e sem polimento, com o objetivo de investigar o efeito de diferentes combinações de parâmetros de usinagem sobre a qualidade superficial do corpo de prova de aço SAE P20. Foram avaliadas variações na profundidade de corte (a_p), entre 0,1 mm e 0,5 mm; no avanço por dente (f_z), entre 0,02 mm e 0,06 mm; e na velocidade de corte (V_c), entre 80 m/min e 120 m/min.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MÍDIA UTILIZADA NO ACABAMENTO POR ARRASTE

A mídia da empresa Otec, popularmente conhecida como H4/400, utiliza um meio abrasivo composto por grãos de casca de nozes, que proporcionam uma homogeneidade excepcional. Esses grãos são combinados com cristais de diamante sintético, estabelecendo uma ligação eficaz por meio de um ligante viscoso. A geometria predominante dos grãos de diamante apresenta ângulos agudos, com dimensões geralmente variando entre 0,3 e 1,5 μm . Esses componentes sólidos foram minuciosamente analisados e documentados por OST em 2016, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Cristais de diamante sintético



Fonte: OST (2016).

4.2 Análise da qualidade da superfície após a usinagem

Nesta parte, os dados referentes à superfície usinada foram organizados, começando pela textura e perfil de rugosidade. Essas informações foram obtidas tanto da superfície criada com a ferramenta original sem tratamento de gume e ferramentas com o gume polido pelo

tratamento de arraste. O método de parada foi padronizado pela área de usinagem, mantendo constância em todas as fases. A análise de rugosidade foi conduzida na mesma direção da passagem da ferramenta sobre o corpo de prova, configurando, assim, uma análise de rugosidade longitudinal.

4.3 Análise de rugosidade

As análises subsequentes concentram-se na superfície usinada, apresentando na tabela 2 abaixo de maneira quantitativa os valores de rugosidade R_a , R_z e R_{max} , medidos em micrometros (μm), avaliando os dados mínimos e máximos, as médias, desvio padrão e a razão dos valores encontrados.

Esses dados foram obtidos em duas condições distintas: utilizando ferramentas no estado original, sem tratamento de polimento, e ferramentas submetidas ao polimento por arraste em meio abrasivo. Essa metodologia possibilita avaliar a eficácia do processo de polimento na melhoria do desempenho das ferramentas e na qualidade da superfície usinada. Além disso, os resultados fornecem uma base comparativa para compreender os efeitos do tratamento de polimento nas características topográficas da superfície, evidenciando seu impacto no desempenho e na durabilidade das ferramentas.

A Tabela 2 apresenta os valores mínimos, intermediários e máximos de velocidade de corte empregados nos ensaios, em associação com o uso de ferramentas com e sem polimento no gume. A planilha completa contendo todos os dados utilizados encontra-se disponível no (APÊNDICE A).

Tabela 2 - Velocidades x Polimento e resultados de rugosidades (R_a , R_z e R_{max}).

Vc(m/min)	Polimento	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
80	sim	1,010	6,127	1,230
80	nao	0,877	6,533	1,157
100	sim	0,863	5,120	1,067
100	nao	0,770	5,587	0,980
120	sim	0,763	5,283	1,007
120	nao	0,677	4,397	0,877

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

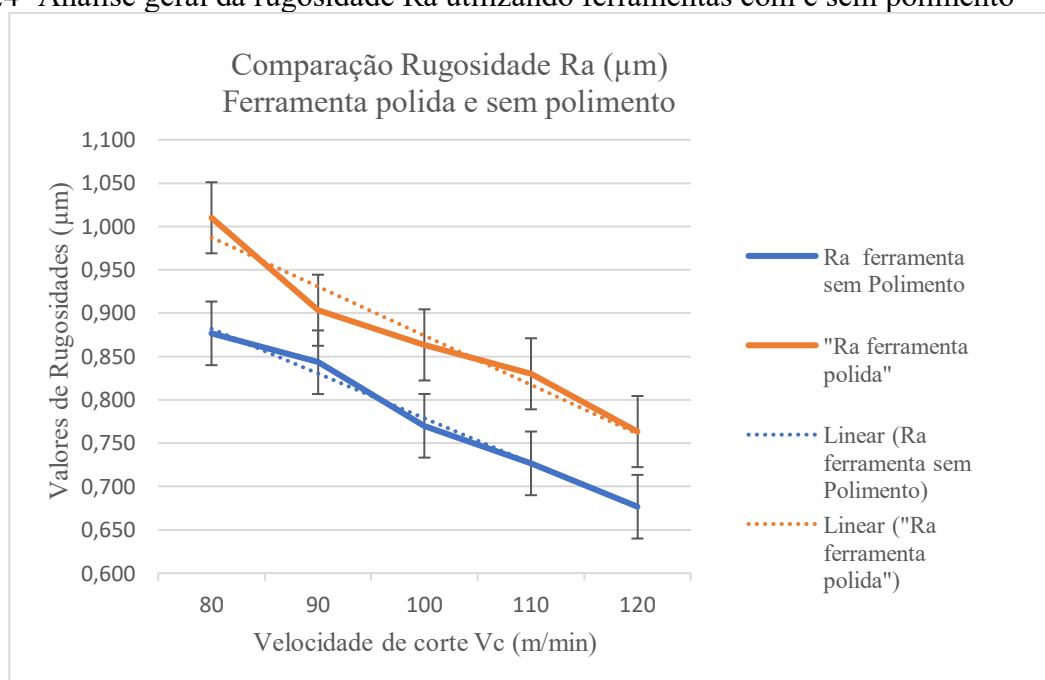
Os dados apresentados na Tabela 2 indicam que a aplicação do polimento nas ferramentas não resultou em alterações significativas na qualidade superficial dos corpos de prova avaliados. Apesar da expectativa de que o tratamento pudesse contribuir para a melhoria dos índices de rugosidade, os resultados obtidos demonstram que a influência do polimento foi

limitada sob as condições operacionais testadas. Dessa forma, torna-se necessário um aprofundamento na análise das interações entre esses elementos para melhor compreender as variáveis que efetivamente impactam a qualidade da superfície usinada.

Os gráficos subsequentes 24, 25 e 26 apresentam uma análise geral dos parâmetros de rugosidades Ra, Rz e Rmax em função das diferentes velocidades de corte utilizadas nos ensaios. Essa representação permite observar o comportamento das características superficiais dos corpos de prova frente à variação desse parâmetro de usinagem. De modo geral, os dados indicam tendências distintas para cada índice de rugosidade, evidenciando a sensibilidade do acabamento em relação velocidade de corte. A análise geral desses gráficos contribui para uma compreensão mais abrangente dos efeitos das condições operacionais sobre a textura final da superfície usinada, auxiliando na definição de parâmetros para a obtenção de melhores resultados em processos industriais.

A Figura 24 mostra a comparação da rugosidade média (Ra) obtida com ferramentas polidas e sem polimento no fresamento do aço AISI P20. Em ambas as condições, verifica-se redução da rugosidade à medida que a velocidade de corte aumenta, confirmando que maiores Vc favorecem melhor acabamento.

Figura 24- Análise geral da rugosidade Ra utilizando ferramentas com e sem polimento

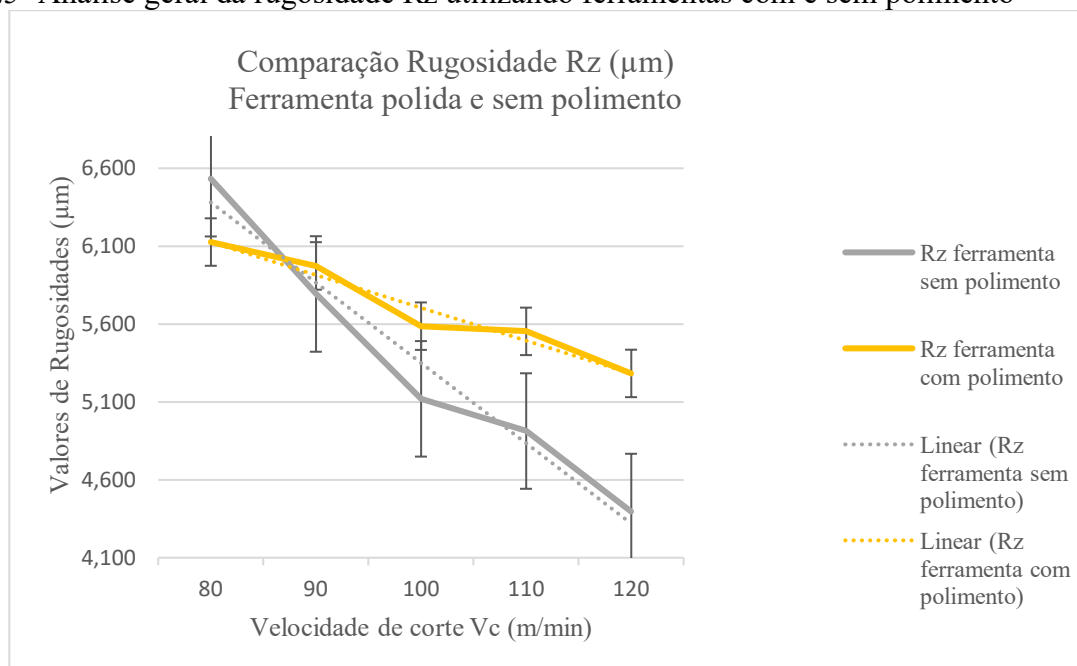


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Em todas as velocidades testadas, a ferramenta sem polimento apresentou valores de R_a menores que a ferramenta polida. Por exemplo, em $V_c = 80$ m/min os valores foram de $0,877 \mu\text{m}$ (sem polimento) contra $1,010 \mu\text{m}$ (polida), e em 120 m/min de $0,677 \mu\text{m}$ contra $0,763 \mu\text{m}$, respectivamente. A diferença entre as condições variou entre $0,07$ e $0,13 \mu\text{m}$.

A Figura 25 apresenta a comparação da rugosidade R_z obtida no fresamento do aço AISI P20 com ferramentas polidas e sem polimento. Em ambas as condições, observa-se redução dos valores de R_z com o aumento da velocidade de corte, confirmando que maiores V_c favorecem melhor acabamento.

Figura 25- Análise geral da rugosidade R_z utilizando ferramentas com e sem polimento

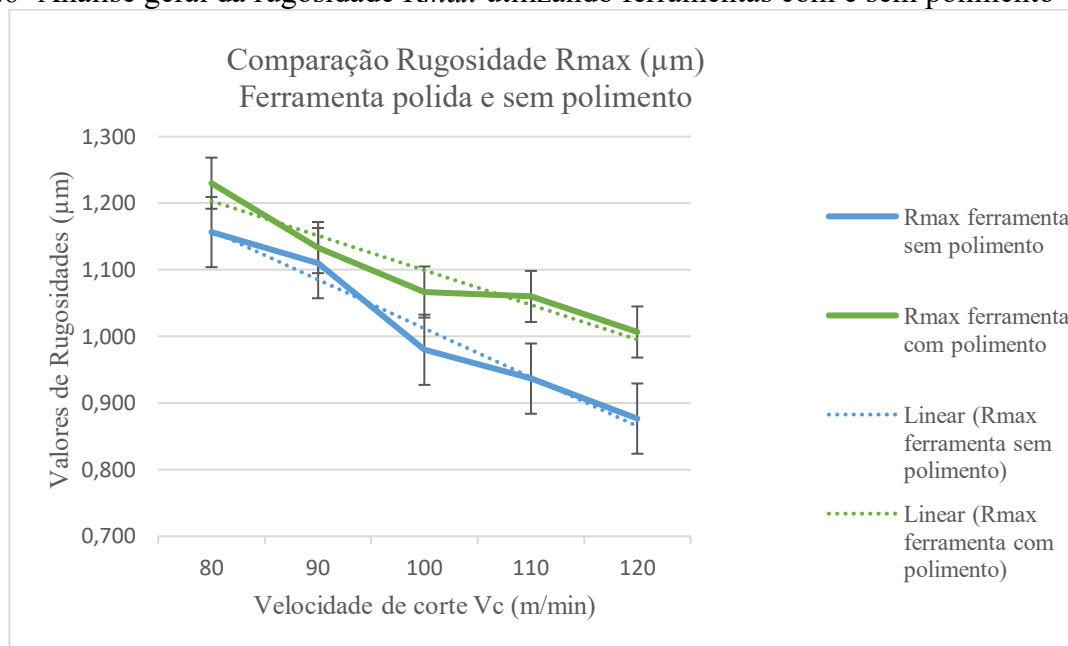


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Entretanto, a ferramenta sem polimento apresentou desempenho superior em todas as velocidades. Em $V_c = 80$ m/min, os valores foram de $6,127 \mu\text{m}$ (sem polimento) contra $6,533 \mu\text{m}$ (polida), e em 120 m/min de $4,397 \mu\text{m}$ contra $5,283 \mu\text{m}$, respectivamente. A diferença média entre as condições variou de $0,4$ a $0,9 \mu\text{m}$, indicando vantagem consistente da ferramenta sem polimento.

A Figura 26 apresenta a comparação da rugosidade R_{max} obtida com ferramentas polidas e sem polimento no fresamento do aço AISI P20. Em ambas as condições, verifica-se diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, confirmando que maiores V_c contribuem para melhor acabamento.

Figura 26- Análise geral da rugosidade R_{max} utilizando ferramentas com e sem polimento



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Em todos os pontos avaliados, a ferramenta sem polimento apresentou resultados inferiores de rugosidade em relação à ferramenta polida. Por exemplo, em $V_c = 80$ m/min, os valores foram de $1,137 \mu m$ (sem polimento) contra $1,230 \mu m$ (polida), enquanto em 120 m/min foram de $0,877 \mu m$ contra $1,007 \mu m$, respectivamente. A diferença entre as condições variou de aproximadamente $0,07$ a $0,13 \mu m$.

A análise conjunta dos três gráficos (R_a , R_z e R_{max}) permite observar tendências consistentes no fresamento do aço AISI P20 com ferramentas de metal duro polidas e sem polimento. Em todos os parâmetros avaliados, houve redução da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte, confirmando que maiores V_c favorecem a obtenção de melhores acabamentos. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que relaciona altas velocidades de corte à diminuição da aderência de material na ferramenta e à menor formação de arestas postiças de corte.

No entanto, em todas as velocidades testadas, a ferramenta sem polimento apresentou valores inferiores de rugosidade quando comparada à ferramenta polida, tanto para R_a , quanto para R_z e R_{max} . As diferenças foram mais evidentes nas extremidades da faixa de velocidade (80 e 120 m/min), enquanto em velocidades intermediárias houve maior sobreposição das barras de erro, indicando proximidade entre os resultados.

Os valores obtidos mostram que o polimento do gume não trouxe ganhos na qualidade superficial. Ao contrário, em todas as análises a ferramenta sem polimento se destacou como a condição de melhor desempenho. Esse resultado pode estar relacionado ao aumento do raio de aresta provocado pelo polimento, que, embora proporcione maior robustez à ferramenta, pode também modificar a interação com o material usinado, gerando rugosidades mais elevadas.

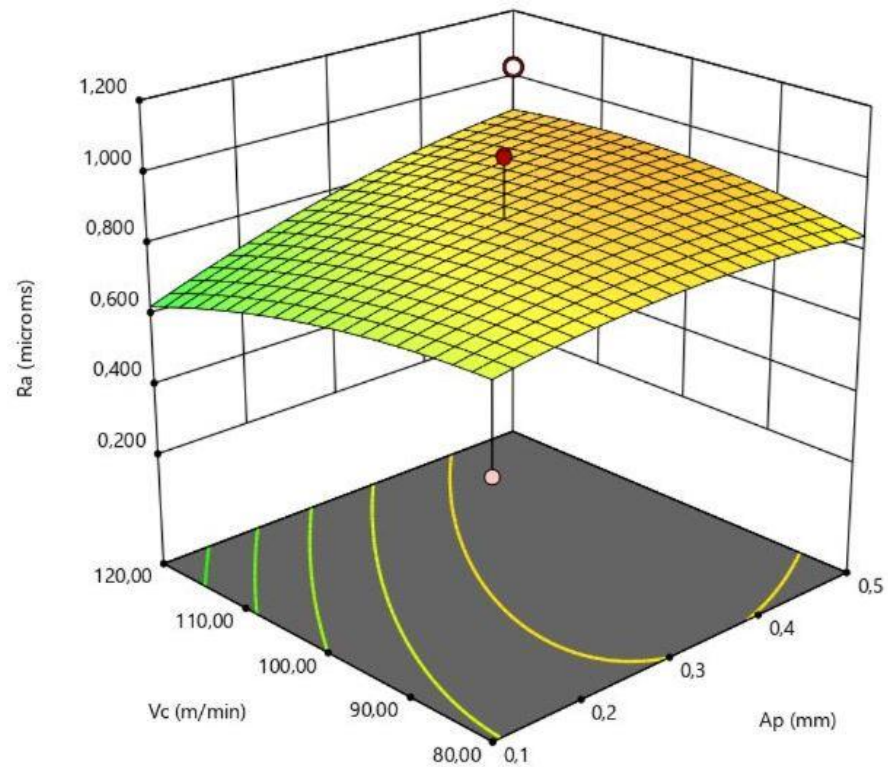
De forma geral, a combinação dos três parâmetros de rugosidade evidencia que a utilização de ferramentas sem polimento é mais vantajosa para as condições de corte investigadas, devendo o tratamento do gume ser avaliado de forma criteriosa conforme o objetivo do processo.

Ao representar graficamente os valores de rugosidade ao longo dos diferentes níveis dos fatores avaliados, é possível identificar regiões em que os efeitos combinados da velocidade de corte e da profundidade de corte resultam em menor ou maior rugosidade. Dessa forma, as curvas de níveis oferecem uma compreensão mais ampla da influência conjunta dos parâmetros, indo além das análises tradicionais. Essa visão integrada é fundamental para a tomada de decisões no contexto da otimização de processos de usinagem, permitindo, por exemplo, a identificação de janelas operacionais ideais para o controle do acabamento superficial.

Adicionalmente, a interpretação dessas curvas pode revelar a presença de efeitos de interação significativa entre os fatores, os quais poderiam passar despercebidos em uma análise isolada. Assim, a utilização desse recurso gráfico contribui para o aprofundamento da análise estatística dos dados experimentais e para a construção de um modelo mais robusto e representativo do comportamento do processo.

Os gráficos de curvas de níveis possibilitam uma análise abrangente do comportamento do parâmetro de rugosidade (R_a) ao longo da superfície usinada, considerando a aplicação de ferramentas com e sem polimento do gume. Essa representação facilita a compreensão da influência do tratamento superficial da ferramenta sobre a qualidade do acabamento. A seguir na Figura 27, está representado análise geral para rugosidade R_a em função da velocidade de corte e profundidade de corte.

Figura 27 - Superfície de resposta e curvas de níveis com utilização de ferramenta polida.



Fonte: autor (2024)

A Figura 27 mostra a superfície de resposta para a rugosidade média (R_a) em função da velocidade de corte (V_c) e da profundidade de corte (A_p). Observa-se que os menores valores de rugosidade são obtidos em condições de maior velocidade de corte associadas a menores profundidades de corte. Nessa região, os valores de R_a tendem a ficar próximos de $0,6 \mu\text{m}$, indicando melhor acabamento superficial.

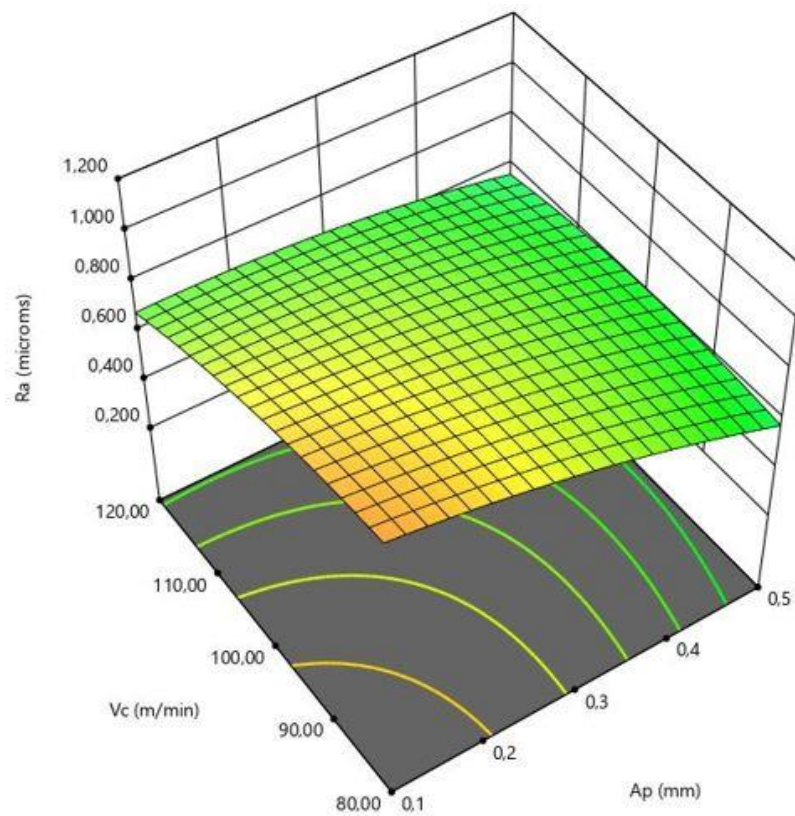
Por outro lado, as maiores rugosidades aparecem em condições opostas, ou seja, em baixas velocidades de corte combinadas com maiores profundidades de corte. Nessas situações, o R_a ultrapassa $1,0 \mu\text{m}$, o que demonstra deterioração significativa do acabamento superficial.

O formato da superfície evidencia que a velocidade de corte exerce maior influência sobre a rugosidade, apresentando queda expressiva nos valores de R_a à medida que V_c aumenta. Já a profundidade de corte também afeta a rugosidade, mas de maneira menos intensa, contribuindo para elevação gradativa dos valores de R_a conforme A_p aumenta.

A figura 28 abaixo, apresenta a análise da influência do polimento das ferramentas de corte sobre a rugosidade R_a , para velocidades acima de 100 m/min e profundidades de corte 0,1mm os valores de R_a , são menores, possivelmente devido à estabilização do processo promovida pelo micro-raio formado no gume de corte. Esses resultados indicam que o polimento pode ter resultados melhores em uma faixa restrita de operação, enquanto ferramentas sem tratamento ainda oferecem bom desempenho em regimes mais amplos.

A Figura 28 abaixo apresenta uma superfície de resposta para a rugosidade média (R_a) em função da velocidade de corte (V_c) e da profundidade de corte (A_p). Assim como no gráfico anterior, observa-se que os menores valores de rugosidade estão associados às condições de maiores velocidades de corte e menores profundidades de corte, atingindo valores próximos de 0,4–0,6 μm .

Figura 28- Superfície de resposta e curva de nível ferramenta sem polimento.



Fonte: autor 2024

À medida que a velocidade de corte diminui e a profundidade de corte aumenta, ocorre elevação da rugosidade, atingindo valores próximos a 1,0 μm . Esse comportamento confirma

que o aumento da velocidade de corte tem efeito positivo na melhoria do acabamento superficial, enquanto o crescimento da profundidade de corte tende a aumentar a rugosidade.

A superfície representada é mais regular e menos inclinada que a anterior, sugerindo uma variação mais suave da rugosidade em função dos parâmetros analisados. Isso pode indicar que, nesse caso, a interação entre velocidade e profundidade de corte foi menos acentuada, mantendo uma tendência clara, porém mais homogênea, de redução da rugosidade com o uso de maiores velocidades.

A análise conjunta dos gráficos 27 e 28 de superfície de resposta evidencia de forma clara a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média (R_a) no fresamento do aço AISI P20. Em ambos os modelos, observa-se a mesma tendência: altas velocidades de corte (V_c) associadas a baixas profundidades de corte (A_p) resultam em menores valores de rugosidade, enquanto a combinação inversa (baixa V_c e alta A_p) conduz a maiores valores de R_a .

Comparando as duas superfícies nota-se que a primeira apresenta maior inclinação, destacando influência mais acentuada da profundidade de corte sobre a rugosidade. Já a segunda superfície mostra comportamento mais homogêneo, sugerindo que, nesse conjunto de dados, a variação da rugosidade foi menos sensível ao aumento da profundidade de corte, embora a tendência de crescimento de R_a ainda seja perceptível.

De modo geral, os gráficos confirmam que a velocidade de corte é o fator mais relevante na redução da rugosidade, exercendo efeito mais expressivo que a profundidade de corte. Assim, a estratégia de usinagem mais adequada para otimizar o acabamento superficial consiste em priorizar maiores valores de V_c , mantendo a profundidade de corte em níveis baixos ou moderados, de forma a equilibrar qualidade superficial e produtividade.

Assim, conclui-se que a seleção adequada dos parâmetros de corte, priorizando altas velocidades de corte e baixas profundidades de corte, é essencial para a obtenção de superfícies com elevada qualidade no fresamento, respeitando-se, entretanto, os limites operacionais da ferramenta e do material trabalhado

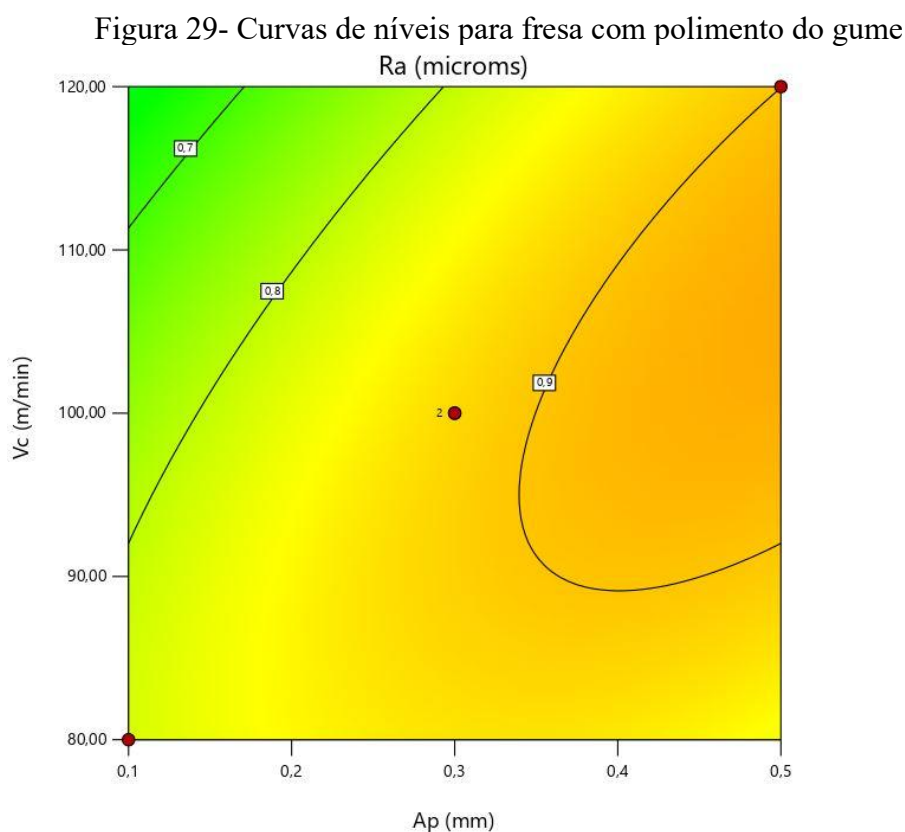
Conforme ilustrado na superfície de resposta da Figura 29, observa-se que a ferramenta sem polimento apresentou um comportamento consistente e estável ao longo de toda a faixa de variação dos parâmetros de corte analisados, especificamente a velocidade de corte e a

profundidade de corte. Esse desempenho uniforme evidencia que a ferramenta manteve sua eficiência e qualidade de usinagem, independentemente das condições operacionais testadas.

Adicionalmente, nota-se uma leve, porém contínua, redução nos valores de rugosidade média (R_a) à medida que se aplicam velocidades de corte superiores a 100 m/min, combinadas com profundidades de corte mais elevadas. Essa tendência pode ser atribuída à estabilização do processo de corte, que se torna mais eficiente favorecendo a formação de cavacos mais regulares e reduzindo as vibrações durante o contato entre a ferramenta e a peça.

A representação gráfica por meio de curvas de níveis configura-se como uma ferramenta eficaz para a visualização e interpretação de superfícies de resposta, possibilitando, de forma clara, a identificação de interações entre variáveis independentes e a delimitação de regiões operacionais otimizadas em processos industriais.

A Figura 29 apresenta o gráfico de curvas de níveis referente ao parâmetro de rugosidade média R_a , representado em função da velocidade de corte (V_c) e da profundidade de corte (A_p). Essa representação permite a análise da influência combinada desses dois fatores sobre o acabamento superficial dos corpos de prova usinados.



Fonte: autor (2024)

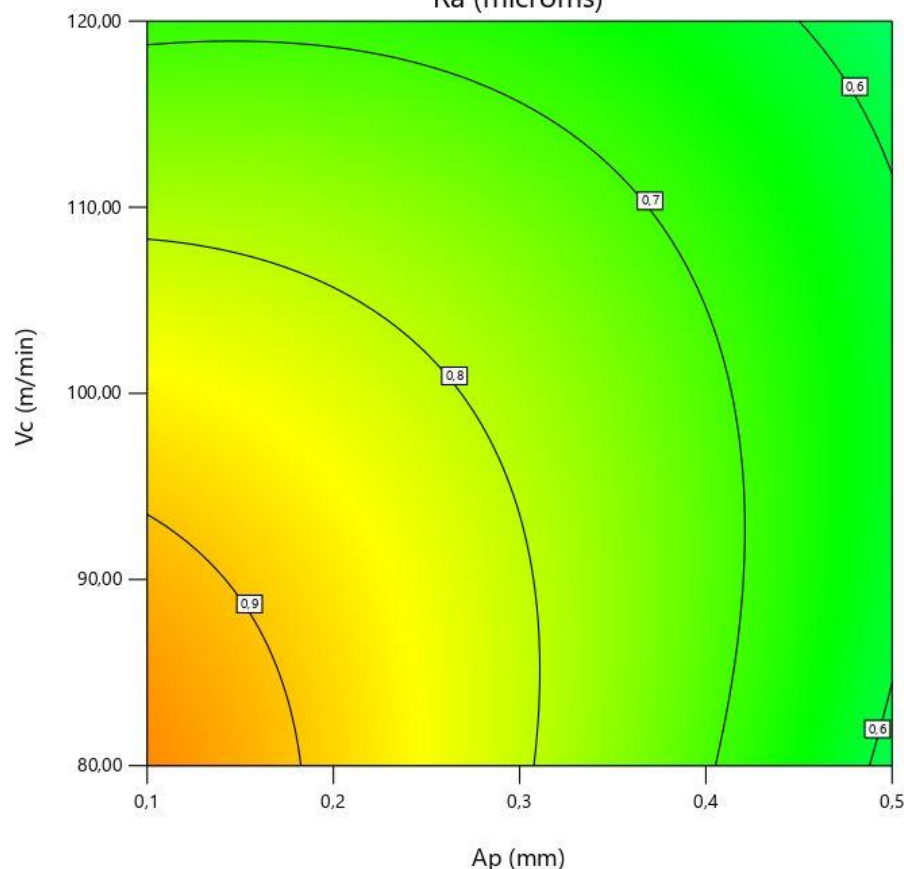
Observa-se na figura 29, que as menores rugosidades se encontram concentradas na região superior esquerda do gráfico, indicada pelas tonalidades em verde, onde os valores de (R_a) atingem cerca de $0,7 \mu\text{m}$. Essa zona corresponde às maiores velocidades de corte (acima de 110 m/min) e às menores profundidades de corte (cerca de $0,1$ a $0,2 \text{ mm}$). Tal comportamento confirma a tendência amplamente documentada na literatura técnica, de que o aumento da velocidade de corte promove a redução da rugosidade superficial, devido à menor formação de aresta postiça e à melhoria da fluidez no corte (POMBO et al., 2008; MACHADO et al., 2013).

Em contrapartida, as maiores rugosidades (cerca de $0,9 \mu\text{m}$ ou superiores) encontram-se nas regiões em tons amarelo-alaranjados, localizadas à direita inferior do gráfico, que correspondem a velocidades mais baixas (80 a 90 m/min) e profundidades de corte elevadas ($0,4$ a $0,5 \text{ mm}$). Nessas condições, é provável que ocorra maior instabilidade no corte, aumento das forças de usinagem e maior geração de calor, fatores que contribuem para a degradação do acabamento superficial.

A análise do gráfico permite, portanto, identificar regiões operacionais ideais, nas quais a combinação entre os parâmetros de corte resulta em acabamento superficial otimizado. Além disso, evidencia a maior sensibilidade da rugosidade ao parâmetro velocidade de corte, quando comparada à profundidade de corte, especialmente dentro do intervalo de operação estudado.

A Figura 30 abaixo apresenta o gráfico de curvas de níveis do parâmetro de rugosidade média R_a , considerando as variáveis operacionais velocidade de corte (V_c), em m/min , e profundidade de corte (A_p), em mm . Esta representação refere-se à condição de usinagem com ferramenta que passou pelo tratamento do gume.

Figura 30-curvas de níveis para fresa sem tratamento do gume
Ra (microms)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A distribuição de cores no gráfico revela que as menores rugosidades estão concentradas nas regiões de altos valores de A_p (acima de 0,4 mm) e altas velocidades de corte (acima de 110 m/min), indicadas pelas tonalidades em verde, com valores de R_a em torno de 0,6 μm .

À medida que se reduzem os valores de V_c e A_p , o acabamento piora, com (R_a) alcançando valores na faixa de 0,9 μm , conforme indicado pela coloração laranja-avermelhada na região inferior esquerda do gráfico. Essa condição corresponde a velocidades de corte abaixo de 90 m/min e profundidades inferiores a 0,2 mm.

Conforme observado nos resultados experimentais e destacado por Pombo et al. (2008) e Machado et al. (2013), a tendência de redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte é mantida. No entanto, os dados obtidos para ferramentas sem polimento revelam uma faixa operacional mais ampla com menores valores de R_a , indicando maior estabilidade e eficiência na formação do cavaco, especialmente em velocidades acima de 110 m/min e profundidades superiores a 0,4 mm. Apresentado por Nathalia Tessari. (2023), a comparação

entre as rugosidades obtidas com ferramentas polidas e não polidas, observou-se que o maior raio resultante do arredondamento causado pelo arraste das mídias proporcionou maior estabilidade da ferramenta, resultando em menores valores de rugosidade e menor variação entre picos e vales.

4.4 Análise da textura

Foram realizadas análises microscópicas das texturas da superfície usinada no corpo de prova resultando em 29 superfícies, serão expostos na sequência as texturas correlacionadas aos padrões e análises de rugosidades apresentadas anteriormente, as demais imagens estão disponíveis no apêndice A, com o objetivo de investigar a influência do acabamento por arraste aplicado à ferramenta de corte na qualidade da superfície final. Essa avaliação possibilitou a identificação de características topográficas resultantes do processo de usinagem.

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam, respectivamente, as texturas obtidas a partir da usinagem realizada com ferramentas sem tratamento do gume e com tratamento por arraste. Em ambas as condições analisadas, é possível identificar, de forma visual, as marcas deixadas pelas passagens sucessivas da ferramenta sobre a superfície usinada. Essas marcas possibilitam uma análise qualitativa do comportamento da ferramenta durante o processo de corte, bem como uma comparação direta dos efeitos do tratamento aplicado ao gume na formação do acabamento superficial. A presença e a regularidade dessas marcas fornecem indícios sobre a estabilidade do processo, o grau de uniformidade na remoção do material e a influência potencial do polimento por arraste na qualidade da superfície final

Figura 28 - Textura para Vc 80 (m/min)

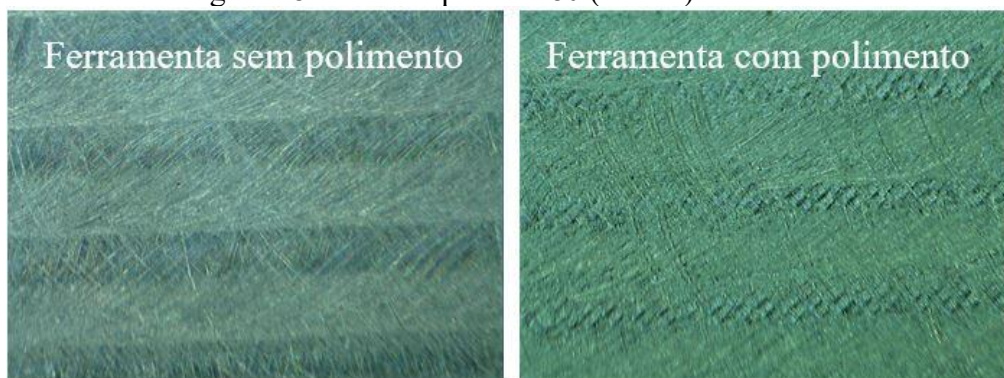


Figura 32 - Textura para Vc 100 (m/min)

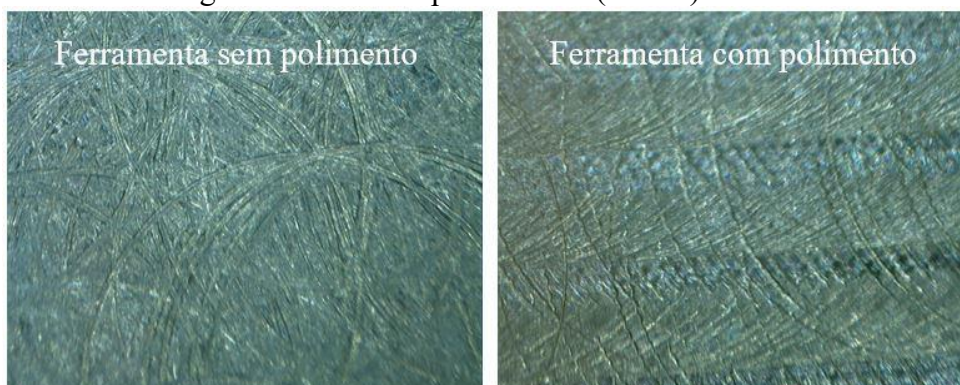
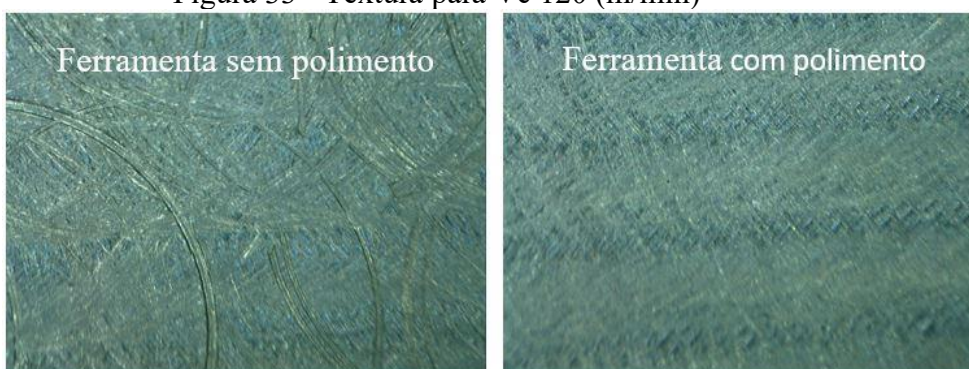


Figura 33 - Textura para Vc 120 (m/min)



Fonte: autor (2024)

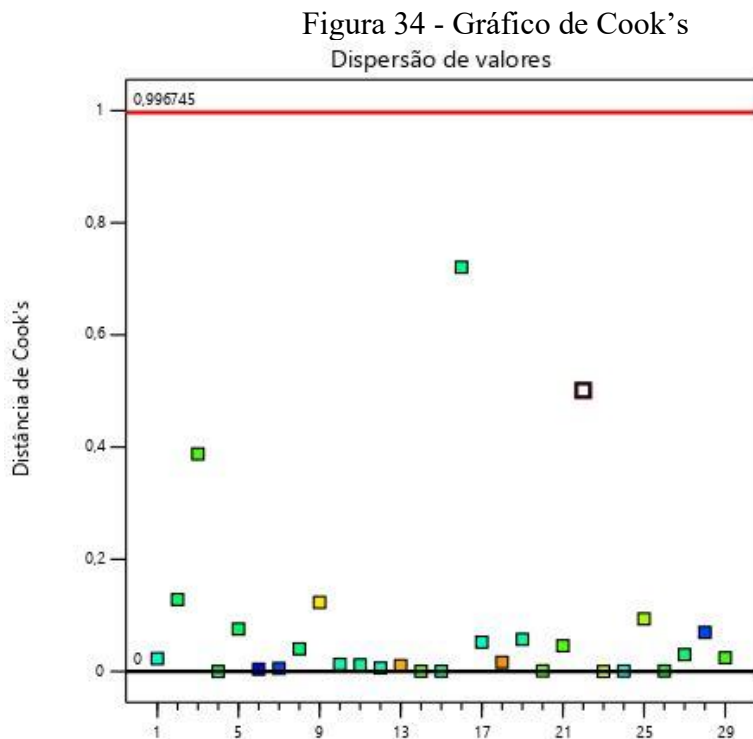
A análise visual das texturas superficiais apresentadas nas Figuras 31, 32 e 33 permite uma avaliação qualitativa dos efeitos do tratamento do gume da ferramenta sobre o padrão de usinagem. Observa-se que, ao empregar ferramentas com polimento no gume, as linhas de passagem da ferramenta se tornam nitidamente mais constante e padronizada. Essa característica pode estar associada à maior estabilidade do contato entre a ferramenta e o material, promovida pelo micro-raio no gume e melhor escoamento do cavaco. Na comparação entre as rugosidades obtidas com ferramentas polidas e não polidas, observou-se que o maior raio resultante do arredondamento causado pelo arraste das mídias proporcionou maior estabilidade da ferramenta, resultando em menores valores de rugosidade e menor variação entre picos e vales,

Contudo, na Figura 32, destacam-se irregularidades no padrão de textura, incluindo marcas não uniformes e padrões visivelmente serrilhados. Essas anomalias podem ser atribuídas a um desgaste localizado na ferramenta, o qual pode ter alterado momentaneamente as condições de corte. Tal desgaste é capaz de causar flutuações na remoção de material ou

desencadear micro vibrações, resultando em variações na profundidade de corte e, consequentemente, em perda de uniformidade no acabamento superficial.

Apesar dessas observações pontuais, a comparação óptica entre as superfícies usinadas não revela variações substanciais entre os grupos analisados. As texturas, de modo geral, mantêm padrões consistentes, o que reforça a confiabilidade dos dados quantitativos de rugosidade obtidos neste estudo. Essa concordância entre as análises visuais e os valores medidos instrumentalmente confere maior robustez às conclusões e valida a metodologia adotada para a avaliação.

A análise detalhada para avaliar as possíveis influências individuais sobre os parâmetros do modelo, está representada a seguir na figura 34, a qual apresenta o gráfico da distância de Cook. Este gráfico auxilia na identificação de valores com impactos desproporcionais na estimativa dos coeficientes da regressão. No eixo horizontal são representados os números de amostragem, enquanto no eixo vertical constam os percentis das amostragens.



Fonte: autor (2024)

A análise do gráfico da distância de Cook apresentado anteriormente na figura 34, evidencia a presença de alguns pontos com dispersões superiores a 20% em relação aos demais

dados, o que pode indicar a ocorrência de variações abruptas em determinados fatores do processo ou ainda a presença de ruídos inerentes às condições experimentais de manufatura. Tais desvios, embora representativos em termos de comportamento isolado, foram avaliados em conjunto por meio da análise de variância (ANOVA), a qual demonstrou que as oscilações observadas permanecem dentro dos limites estatisticamente aceitáveis.

Dessa forma, constata-se que os referidos ruídos não comprometem a confiabilidade dos resultados obtidos, sendo possível manter o nível de confiança de 95% nas médias analisadas. Ressalta-se, portanto, a robustez do modelo estatístico adotado, bem como a validade das inferências realizadas a partir dos dados experimentais.

4.5 Projeto e análise de experimentos.

O Design de Experimentos (DOE) é uma abordagem estatística que organiza e estrutura uma sequência de testes de forma eficiente. Essa metodologia visa otimizar o planejamento, a execução e a análise dos dados, além de minimizar custos de tempo e recursos, garantindo que os objetivos iniciais sejam atingidos de maneira eficaz [Hackenhaar, 2016]. Para um DOE bem-sucedido, é fundamental que os participantes tenham uma compreensão clara do propósito da experimentação, definindo com precisão os fatores a serem analisados, o modo de condução dos testes e, pelo menos, uma noção básica de como os dados serão interpretados [Montgomery, 2004].

Na compilação dos dados de entrada, foi elaborado um planejamento experimental composto por 29 experimentos. As sequências derivadas desse planejamento, juntamente com os resultados de rugosidade medidos em cada região do experimento completo, estão apresentadas em anexo na tabela 7. Da mesma forma, a Tabela 3 a seguir exhibe os resultados quantitativos para a análise global do experimento, incluindo os valores de rugosidade R_a , R_z e R_{max} , bem como suas respectivas análises de média, desvio padrão e a razão entre os valores mensurados.

Tabela 3 - Análise geral dos fatores

Saida (μm)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Razão
R_a	0,232	1,06	0,643	0,2112	4,57
R_z	1,671	7,443	4,31	1,37	4,45
R_{max}	0,333	1,383	0,8445	0,2597	4,15

Fonte: autor (2024)

Os índices e valores resultantes dos experimentos conduzidos neste estudo estão apresentados na Tabela 4, apresentando a soma total dos valores, suas médias os graus de liberdade (df) os valores de Fisher e o valor da hipótese (p) para avaliar a rejeição ou não da média de amostragem, levando em consideração um grau de liberdade de 5%, conferindo assim uma confiabilidade de 95% ao experimento.

Os resultados estatísticos da análise dos efeitos dos fatores de usinagem sobre a rugosidade superficial da peça usinada. Os fatores considerados foram: profundidade de corte (A – DOC), velocidade de corte (B – Vc), avanço por dente (C – fz) e condição da ferramenta (D – polida ou não polida). De maneira complementar encontram-se na página de anexos as tabelas da anova para as rugosidades Rz e Rmax.

Tabela 4 - Função Anova para valores de Ra

Variaveis	Soma dos quadrados	df	Média dos quadrados	Valor -F	Valor-p	
Modelo	0,8066	13	0,0620	2,1025	0,0851	Não significante
A-DOC	0,0083	1	0,0083	0,2819	0,6032	
B-Vc	0,0433	1	0,0433	1,4689	0,2443	
C-fz	0,0146	1	0,0146	0,4955	0,4923	
D-p/np	0,0732	1	0,0732	2,4809	0,1361	
AB	0,0339	1	0,0339	1,1488	0,3007	
AC	0,0640	1	0,0640	2,1691	0,1615	
AD	0,1485	1	0,1485	5,0340	0,0404	
BC	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,9996	
BD	0,0050	1	0,0050	0,1680	0,6877	
CD	0,0039	1	0,0039	0,1308	0,7226	
A ²	0,0093	1	0,0093	0,3167	0,5819	
B ²	0,0095	1	0,0095	0,3227	0,5784	
C ²	0,2242	1	0,2242	7,5968	0,0147	
Resíduos	0,4426	15	0,0295			
Falta de ajuste	0,4117	10	0,0412	6,6492	0,0248	Significante
Erro	0,0310	5	0,0062			
	1,2492	28				

Fonte: Autor 2025

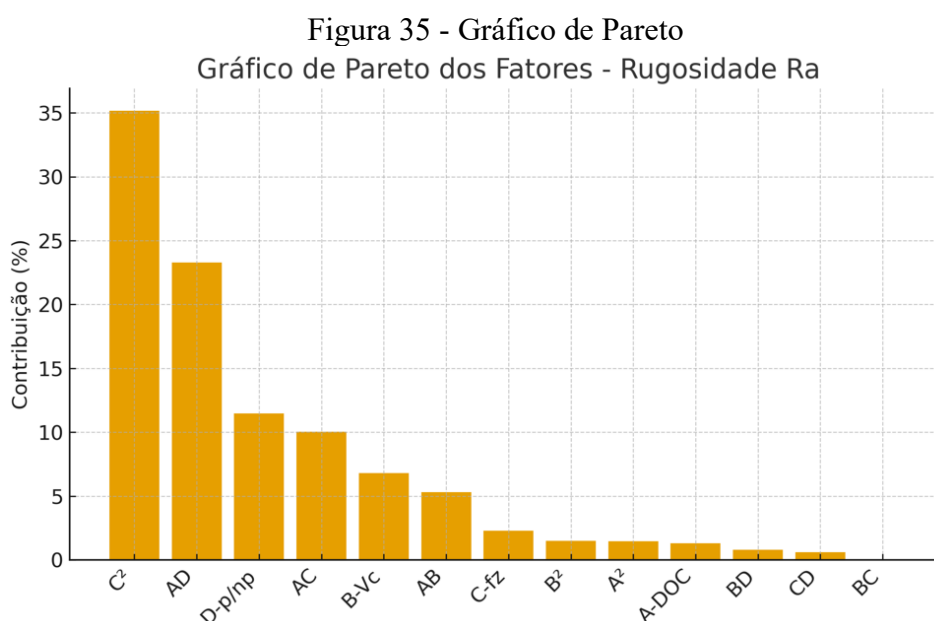
Entre os fatores principais, nenhum apresentou significância isolada: profundidade de corte (A), velocidade de corte (B) e avanço por dente (C) exibiram valores de p superiores a 0,05, assim como o fator qualitativo referente ao polimento do gume (D). No entanto, destaca-se a interação AD (profundidade de corte x polimento), que foi significativa (p = 0,0404),

demonstrando que a influência da profundidade de corte na rugosidade depende da condição de tratamento da ferramenta. Isso sugere que o efeito do polimento pode potencializar ou reduzir o impacto da profundidade de corte no acabamento.

Outro resultado relevante foi o termo quadrático de C (avanço por dente), que apresentou significância ($p = 0,0147$). Isso indica que a rugosidade responde de forma não linear ao avanço por dente, ou seja, existe uma faixa de valores que minimiza a rugosidade antes que esta volte a aumentar em avanços maiores.

Por fim, a análise evidenciou que o ajuste do modelo apresentou falta de ajuste significativa ($p = 0,0248$), o que sugere que a equação de regressão não explicou adequadamente toda a variabilidade dos dados experimentais. Esse resultado reforça a necessidade de considerar fatores adicionais ou ampliar o número de ensaios para aprimorar o modelo.

Em síntese, embora o modelo global não tenha sido significativo, a ANOVA revelou efeitos importantes: o avanço por dente (C) possui influência significativa em termos quadráticos. A interação entre profundidade de corte e polimento (AD) afeta a rugosidade. Esses resultados indicam que a análise isolada dos fatores pode mascarar efeitos combinados e não lineares, que se mostraram determinantes para a qualidade superficial apresentados na figura 35.



Fonte: autor 2025

A Figura 35 apresenta o gráfico de Pareto referente à análise de variância (ANOVA) dos fatores que influenciam a rugosidade média (R_a) obtida no fresamento do aço AISI P20. Observa-se que o termo quadrático do avanço por dente (C^2) representa o maior percentual de contribuição, correspondendo a aproximadamente 38% da variação total do modelo. Esse resultado evidencia que a influência do avanço não é linear, indicando a existência de uma faixa ótima intermediária capaz de minimizar a rugosidade superficial.

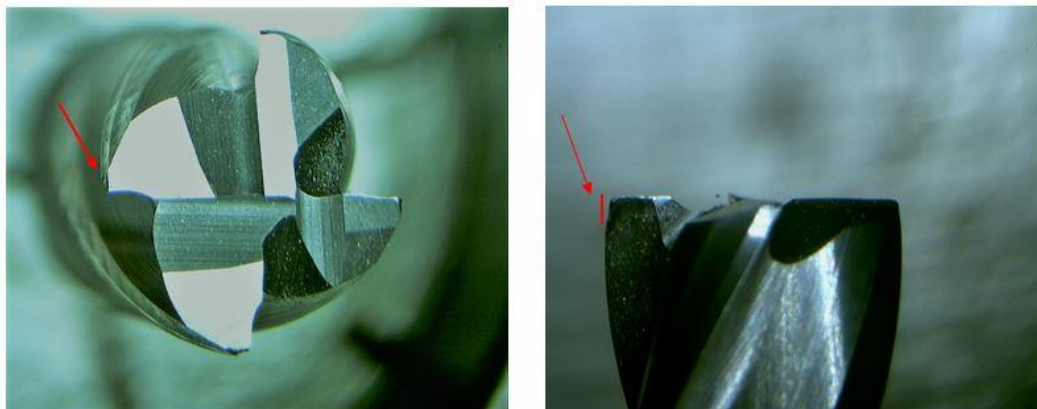
O segundo fator mais relevante é a interação entre a profundidade de corte e o tipo de ferramenta (AD), com contribuição aproximada de 25%. Essa interação demonstra que o efeito do tratamento do gume (ferramenta polida ou não polida) está fortemente associado à profundidade de corte empregada. Em seguida, o tratamento do gume (D) apresenta influência direta moderada, responsável por cerca de 12% da variação, evidenciando que o polimento tende a melhorar o acabamento, embora de forma dependente das demais condições de corte.

As interações AC (profundidade de corte x avanço) e B (velocidade de corte) apresentam contribuições de aproximadamente 11% e 7%, respectivamente, indicando efeitos secundários sobre a resposta. Os demais fatores analisados apresentaram influência inferior a 5%, sendo considerados estatisticamente pouco expressivos para o modelo proposto.

4.6 ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS FERRAMENTAS APÓS O FRESAMENTO

A análise microscópica da ferramenta polida desempenha um papel crucial na identificação do desgaste da ferramenta, permitindo avaliar com precisão o estágio do processo de deterioração ou, em casos mais avançados, indicar o término da vida útil da ferramenta. Essa análise fornece informações detalhadas sobre a extensão do desgaste e suas implicações no desempenho da ferramenta durante o processo de usinagem, detalhada nas figuras 36 e 37 a seguir.

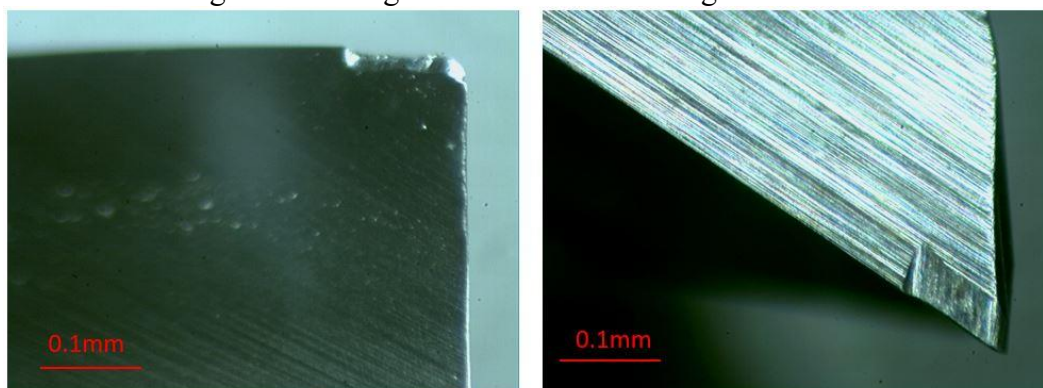
Figura 36 - Análise microscópica da ferramenta após o fresamento



Fonte: registrado pelo autor (2024).

A Figura 37 apresenta a análise microscópica das ferramentas após os ensaios de fresamento evidencia diferentes mecanismos de desgaste que influenciaram diretamente a qualidade superficial obtida.

Figura 37 - Desgaste frontal e flanco do gume de corte



Fonte: registrado pelo autor (2024)

Na ferramenta apresentada à esquerda observa-se a ocorrência de micro-lascamentos localizados na aresta de corte. Esse tipo de desgaste decorre de concentrações de tensões mecânicas e esforços cíclicos durante a usinagem, comprometendo a integridade do gume e ocasionando instabilidade no processo. Como consequência, há maior tendência de variação da rugosidade superficial devido à perda de continuidade da aresta.

Já a ferramenta da direita apresenta desgaste por abrasão, caracterizado pelas marcas lineares ao longo da superfície de saída, além de uma falha localizada na extremidade da aresta. Esse mecanismo sugere maior influência do atrito e do aquecimento na região de corte, intensificando o desgaste progressivo e reduzindo a eficiência da ferramenta.

De forma geral, os mecanismos identificados — micro-lascamento, abrasão e possíveis indícios de fadiga térmica — são típicos no fresamento do aço AISI P20 com ferramentas de metal duro. Esses fenômenos contribuem para o aumento da rugosidade final da peça e indicam a necessidade de escolha criteriosa dos parâmetros de corte, de forma a minimizar esforços dinâmicos e reduzir o desgaste prematuro das ferramentas.

Os desgastes observados nas ferramentas, conforme apresentado nas figuras 36 e 37, encontram-se dentro dos limites considerados aceitáveis para a utilização da ferramenta. Segundo a literatura especializada, como demonstrado por Bordin (2012). Desgastes superiores a 0,2 mm são comumente classificados como significativos, podendo comprometer o

desempenho do processo de usinagem. No entanto, no contexto do presente estudo, os desgastes identificados não excederam os valores de 0,2 mm, desta forma não devem ter influenciado significativamente na qualidade superficial.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar os efeitos do polimento por arraste na preparação do gume de fresas de metal duro e sua influência sobre o desempenho no processo de usinagem, com foco na qualidade da superfície do corpo de prova. A partir da análise dos dados obtidos, é possível apresentar as seguintes considerações finais:

A preparação do gume por meio do polimento por arraste demonstrou ser um processo tecnicamente viável, promovendo o arredondamento controlado do gume e contribuindo para uma maior estabilidade do contato entre ferramenta e material. Entretanto, os efeitos práticos desse tratamento sobre o acabamento não influenciaram na rugosidade final da peça usinada.

Nas condições operacionais adotadas neste estudo, os fatores avanço da ferramenta e profundidade de corte não demonstraram influência significativa sobre o acabamento superficial dos corpos de prova. Os efeitos desses parâmetros podem ter sido suprimidos ou mascarados pela predominância do fator velocidade de corte, o qual apresentou variações mais expressivas e estatisticamente perceptíveis dentro do intervalo avaliado. Esse comportamento sugere que, para o material e as condições de usinagem estudadas, a velocidade de corte desempenha papel dominante na determinação da rugosidade superficial, enquanto os demais fatores operam com influência reduzida ou estatisticamente irrelevante, considerando o nível de confiança de 95% adotado na análise dos dados.

A avaliação da textura das amostras, por meio de imagens e curvas de níveis, reforçou os dados obtidos nas medições de rugosidade, evidenciando que as marcas deixadas pelas ferramentas polidas e não polidas apresentaram padrões semelhantes. Em algumas amostras, observou-se a presença de padrões irregulares possivelmente relacionados ao desgaste da ferramenta, mas sem comprometer a integridade geral dos resultados.

O polimento do gume (D) e principalmente sua interação com a profundidade de corte (AD) foram os fatores de maior relevância, o avanço por dente (fz) só teve efeito quando considerado em comportamento não linear (C^2). Rz e Rmax são os parâmetros mais indicados

para avaliar a influência das condições de corte, enquanto R_a é limitado e pode mascarar diferenças importantes.

Dessa forma, conclui-se que, embora o polimento do gume represente um avanço tecnológico no preparo de ferramentas, sua eficácia na melhoria do acabamento depende fortemente da combinação com os parâmetros de corte aplicados. A seleção adequada desses parâmetros é essencial para garantir maior eficiência, produtividade e qualidade no processo de usinagem.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- a)** medir a rugosidade após cada bloco usinado e capturar imagens microscópicas da ferramenta para monitorar o desgaste, verificando se ocorre de maneira uniforme ou seguindo um parâmetro específico estabelecido;
- b)** analisar a variação da rugosidade ao utilizar diferentes meios abrasivos;
- c)** conduzir experimento com os mesmos dados, mas em uma peça contínua para evitar usinagem com características de corte interrompidas;
- d)** realizar teste para determinar a vida útil da ferramenta;
- e)** Repetir o experimento ajustando as velocidades de corte para a faixa de 105 a 115 m/min, considerando que, nessa condição, a ferramenta polida demonstrou proporcionar um acabamento superficial superior.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME B46.1: Surface texture, surface roughness, waviness and lay*. [S.l.], 2002.

ANÁLISE comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex DX 2205 e LDX 2101. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. Rio de Janeiro, 2002.

AURICH, J. C.; EFFGEN, C. Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. *Production Engineering – Research and Development*, [s.l.], v. 9, p. 329-336, 2015.

BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI 1045 with coated WC-Co inserts. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 108-126, jan. 2012.

BET, L. *Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor*. 1999. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 76-80, 2008.

BORDIN, F. M. *Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos*. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

BORDIN, F. M.; ZEILMANN, R. P. Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling. *Procedia CIRP*, [s.l.], v. 13, p. 103-107, 2014.

Bogo (2021) – Influência do tratamento do gume por polimento com escovas de cerdas abrasivas sobre a vida útil da ferramenta.

BRINKSMEIER, E. et al. Metal cutting—mechanics and monitoring. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 55, n. 2, p. 619–642, 2006.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 100, p. 9–15, 2000.

DAVIM, J. P. *Machining: fundamentals and recent advances*. London: Springer, 2008.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals*, [s.l.], v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Germany, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

FERRARESI, D. *Usinagem dos metais: fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgar Blücher, 1970.

GARCIA, F. R. *Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex dx 2205 e ldx 2101*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

GÜNTHER, M.; BIERMANN, D. Influence of cutting edge preparation on surface integrity in micromachining. *Procedia CIRP*, v. 46, p. 243–246, 2016.

HELLENO, A. L. *Investigação de métodos de interpolação para trajetória da ferramenta na usinagem de moldes e matrizes com alta velocidade*. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d'Oeste, 2004.

HOOGSTRATE, A. M.; KALS, H. J. J. Cutting edge preparation and its effects on tool life and workpiece surface. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 1, p. 43–46, 1993.

JAWAHIR, I. S. et al. Surface integrity in material removal processes: recent advances. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 60, p. 603-626, 2011.

JOSSO, B. et al. Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation. *Wear*, [s.l.], v. 252, n. 5, p. 491-500, 2002.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufacturing engineering and technology*. 6th ed. [S.l.]: Pearson, 2009.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. *A estratégia em ação: balanced scorecard*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1997.

KARPUSCHEWSKI, B.; BYELYAYEV, O.; MAIBORODA, V. S. Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, [s.l.], v. 58, n. 1, p. 295-298, 2009.

KLOCKE, F. *Manufacturing processes I: cutting*. Springer, 2011.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. *Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 6. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

KYOCERA Disponível em: <https://www.kyoceraprecisiontools.com>. Acesso em: 01 maio 2025.

M'SAOUBI, R. et al. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, v. 1, n. 1/2, p. 203-236, 2008.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. Disponível em: <https://bv4.digitalpages.com.br/?term=Usinagem&searchpage=1&filtro=todos&from=busca&page=1§ion=0#/legacy/171653>. Acesso em: 05 maio 2019.

MESQUITA, N. G. *Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação*. 1992. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1992.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 6th ed. Arizona: John Wiley e Sons, 2005.

TESSARI, N. Machine learning para predição de rugosidades e desgastes de fresas com diferentes polimentos por arraste. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, (2023).

NICOLA, G. L. *Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido*. 2008. 137 p. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2008.

NOVASKI, O. *Introdução à engenharia de fabricação mecânica*. São Paulo: Edgar Blücher, 1994.

OST, C. A. Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificação. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2016.

OTEC. *Edge rounding and polishing of tools*. 1 apresentação, 46 slides. [S.l.: s. n.], 2008. Disponível em: <https://www.slideserve.com/wpharris/edge-rounding-and-polishing-of-tools-powerpoint-ppt-presentation>. Acesso em: 01 maio 2022.

PAUCKSH, E. et al. *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. [S.l.]: Vieweg-Teubner, 2008.

RECH, J. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. *Surface & Coatings Technology*, [s.l.], n. 200, p. 5132-5139, 2006.

RODRÍGUEZ, C. J. C. *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. 2009. 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Kassel. Alemanha, 2009.

ROPAN. *Home*. Disponível em: <https://www.ropan.com.br/>. Acesso em: 19 jun. 2022.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

STEPIEŃ, P. Micro-geometrical characteristics of the cutting edge as the intersection of two rough surfaces. *Wear*, [s.l.], n. 269, p. 249-261, 2010.

TIKAL, F. *Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden*. [S.l.]: Kassel University Press, 2009.

UHLMANN, E. et al. Effects of different cutting edge preparation methods on micro milling performance. *Procedia CIRP*, [s.l.], v. 46, p. 352-355, 2016.

VIEIRA, S. *Análise de Variância (Anova)*. São Paulo: Atlas, 2006.

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 18 à 21 de agosto de 2010, Campina Grande, Paraíba, Brasil. *CONEM-2010*.

WEINERT, K. et al. Influence of cutting edge rounding on tool wear and surface integrity in hard turning. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 117–120, 2004.

WYEN, C.; KNAPP, W.; WEGENER, K. A new method for the characterisation of rounded cutting edges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s.l.], n. 59, p. 899-914, 2012.

XU, Y. et al. Performance of AlTiN and diamond coated carbide tools in dry high-speed milling of electro discharge machining graphite. *Journal of Engineering Manufacture*, [s.l.], p. 1-10, 2016.

ZEILMANN, R. P. et al. Integridade no fresamento com ferramentas submetidas a tratamento superficial. In: *CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 7., 2012, São Luiz. Anais [...]. São Luiz: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012.

ZEILMANN, Z. P. et al. Desempenho de fresas de aço-rápido após tratamento superficial. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 7., 2013, Itatiaia. Anais [...]. Itatiaia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013

APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Figura 29 – Máquina de acabamento por arraste em mídia abrasiva



Fonte: registrado pelo autor (2023).

Figura 30 – Centro de Usinagem ROMI



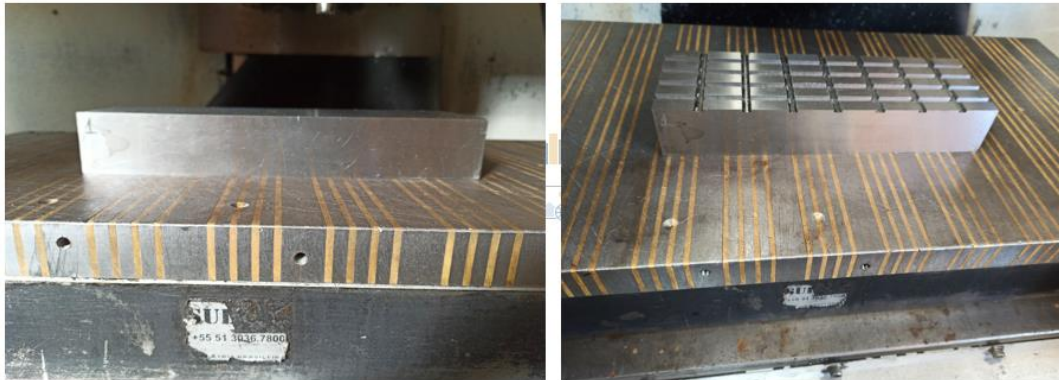
Fonte: registrado pelo autor (2024).

Figura 31 – Rugosímetro SJ-201 utilizado nos ensaios



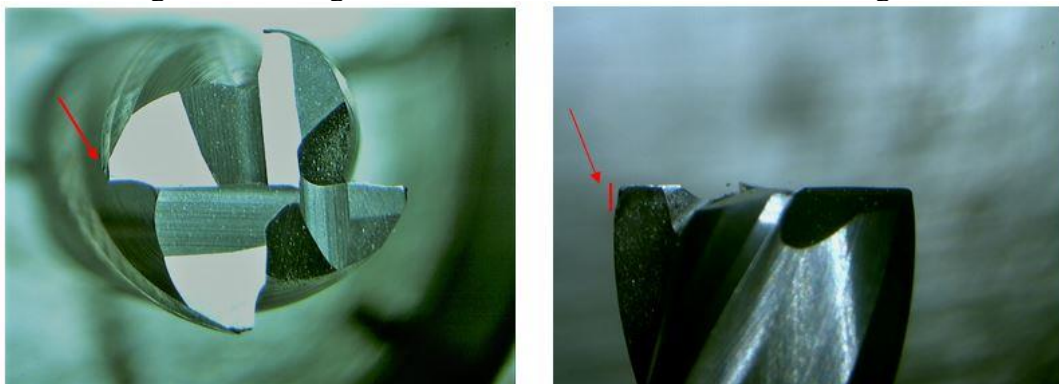
Fonte: registrado pelo autor (2024).

Figura 32 – Corpo de prova



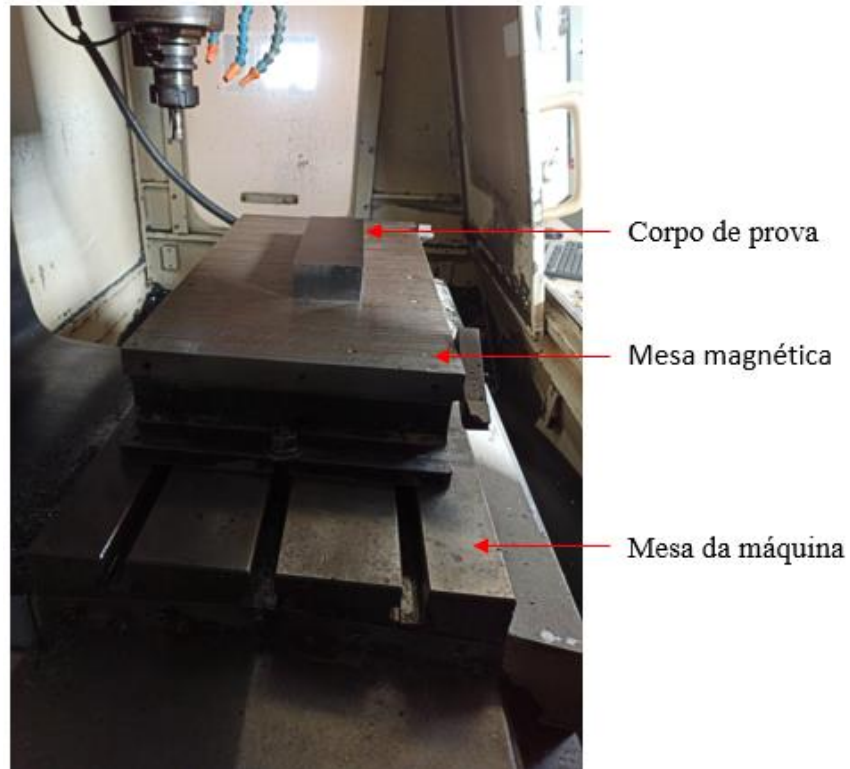
Fonte: registrado pelo autor (2024).

Figura 33 – Desgaste ocorrido na fresa com tratamento do gume



Fonte: registrado pelo autor (2024).

Figura 34 – Fixação do corpo de prova



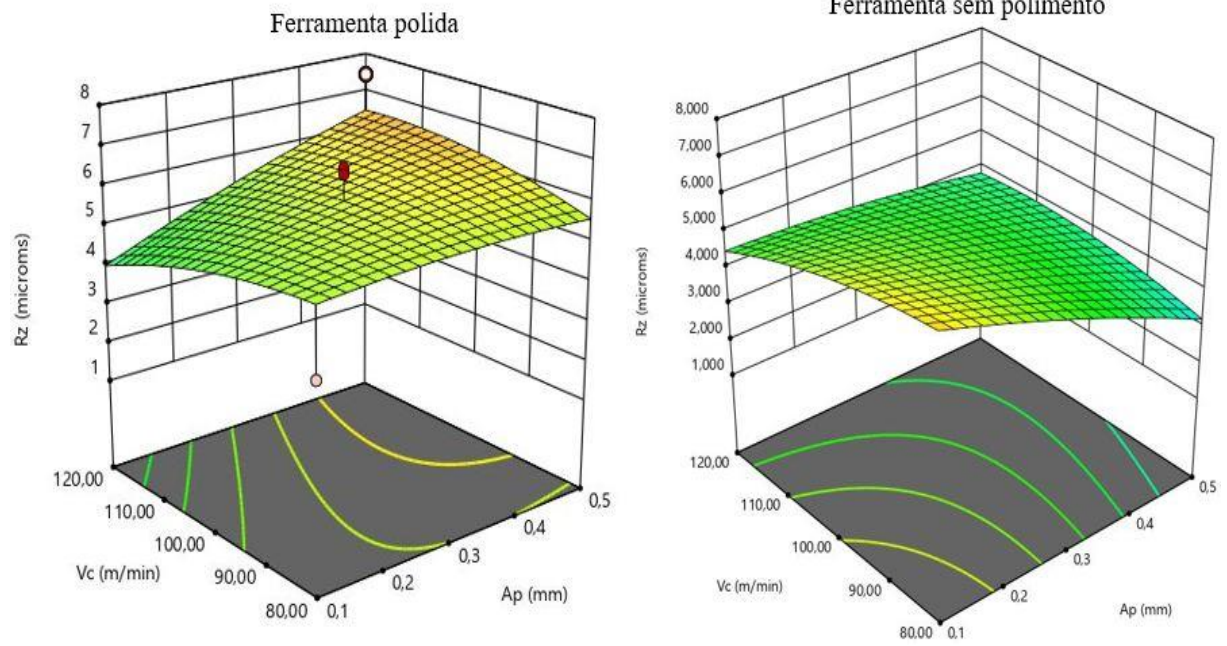
Fonte: registrado pelo autor (2024).

Figura 35 - Fresadora convencional utilizada para fixar o rugosímetro.



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 36- Superfície de resposta e curvas de níveis para padrão de rugosidades Rz



Fonte: autor 2024.

APÊNDICE B – TABELAS UTILIZADAS

Tabela 5 - Fatores controláveis e rugosidades mensuradas

Fatores de entrada					Dados de saída		
Número de experimentos	Profundidade de corte $A_p(\text{mm})$	Velocidade de corte $V_c(\text{m/min})$	Avanço por dente $f_z(\text{mm/rot})$	Ferramenta Polida	Rugosidade média $R_a(\mu\text{m})$	Rugosidade média $R_z(\mu\text{m})$	Rugosidade média $R_q(\mu\text{m})$
3	0,1	120	0,02	SIM	0,276667	3,397	0,754
5	0,12	98,2	0,026	SIM	0,38	4,013	0,75
17	0,1	89,6	0,02	NÃO	0,4	3,223	0,812
20	0,5	80	0,029	NÃO	0,4	4,037	0,78
12	0,5	80	0,06	SIM	0,49	4,077	0,77
15	0,3	120	0,06	SIM	0,503333	1,671	0,333
16	0,41	120	0,02	NÃO	0,513333	2,075	0,426
28	0,5	111,2	0,06	NÃO	0,517	3,887	0,767
2	0,3	80	0,02	SIM	0,53	2,813	0,55
10	0,49	101,85	0,054	SIM	0,53	3,523	0,727
13	0,1	100	0,06	SIM	0,533333	3,653	0,69
29	0,5	111,2	0,06	NÃO	0,54	3,481	0,847
4	0,32	114	0,022	SIM	0,56	6,47	1,35
19	0,19	120	0,028	NÃO	0,563333	3,23	0,769
6	0,1	80	0,04	SIM	0,573333	3,657	0,703
14	0,3	120	0,06	SIM	0,576667	3,76	0,753
11	0,22	80	0,06	SIM	0,69	3,463	0,747
18	0,1	89,6	0,02	NÃO	0,696667	6,633	1,383
21	0,5	80	0,029	NÃO	0,698	3,643	0,697
27	0,1	80	0,06	NÃO	0,699	3,676	0,851
23	0,29	100,94	0,039	NÃO	0,71	3,199	0,796
24	0,29	100,94	0,039	NÃO	0,737	5,273	1,063
25	0,1	120	0,05	NÃO	0,74	5,71	1,117
22	0,28	100,6	0,039	NÃO	0,768	3,185	0,674
9	0,5	120	0,04	SIM	0,803333	4,583	0,957
1	0,5	99,8	0,02	SIM	0,823333	4,37	0,897
26	0,34	80	0,06	NÃO	0,877	3,967	0,707
8	0,3	100	0,04	SIM	1,05333	2,07	0,36
7	0,3	100	0,04	SIM	1,06	2,937	0,583

Fonte: autor (2024)

Tabela 6 - Valores das rugosidades mensuradas Ra, Rz e Rmax

Ra			RZ			Rmax		
1,12	0,73	0,78	5,63	5,16	5,05	1,13	0,94	1
1,07	1,34	1,13	8,1	9,4	7,52	1,37	1,68	1,41
0,83	0,83	0,83	5,8	5,21	5,75	1,06	1,04	1,08
0,64	0,68	0,80	4,67	5,38	5,34	0,86	0,92	1,04
0,67	0,64	0,92	4,52	4,89	6,32	0,88	0,86	1,16
0,8	0,81	0,7	5,7	4,87	4,79	1,02	1,01	0,91
0,74	0,64	0,67	4,88	5,06	5,25	0,97	0,85	0,88
0,63	0,7	0,7	4,15	4,59	4,45	0,8	0,91	0,92
0,73	0,64	0,76	5	4,41	5,02	0,95	0,84	0,97
0,74	1	0,89	5,78	7,13	6,69	0,97	1,27	1,23
1,04	1,11	0,88	6,2	6,15	5,57	1,27	1,33	1,09
0,68	0,7	0,712	4,62	4,61	5	0,85	0,92	0,93
1,11	1,04	1,25	6,33	6,41	7,34	1,34	1,28	1,48
1,12	1,02	0,95	8,16	7,16	7,01	1,46	1,27	1,22
1,18	1,29	1,29	8,6	8,6	8,55	1,53	1,68	1,68
0,89	0,88	0,76	5,59	5,94	5,85	1,13	1,16	1,04
0,78	0,79	0,72	5,28	5,42	5,15	1,02	1,02	0,98
0,84	0,76	0,99	5,78	5,12	5,76	1,06	0,96	1,18
0,7	0,73	0,71	5,22	5,78	5,25	0,93	0,98	0,96
0,95	0,87	0,89	6,7	6,18	5,5	1,21	1,1	1,09
0,73	0,74	0,71	5,16	4,94	4,64	0,94	0,96	0,91
0,73	0,79	0,79	4,57	5,04	5,21	0,93	1,01	1,02
0,85	0,82	0,82	5,56	6,36	5,89	1,09	1,09	1,06
0,7	0,86	0,66	4,98	5,6	4,41	0,93	1,07	0,85
0,69	0,71	0,74	4,77	4,63	5,18	0,9	0,91	0,95
0,7	0,67	0,78	5,11	5,08	5,72	0,93	0,9	1,06
0,78	0,81	0,8	5,95	6,01	5,9	1,02	1,07	1,05
1,15	0,84	1,01	7,16	5,84	6,87	1,38	1,04	1,28
1,13	1,11	1,13	6,54	7,14	7,16	1,36	1,36	1,42

Fonte: autor (2024)

Tabela 7 - Resultados anova para rugosidade Rz

Variáveis	Soma dos quadrados	df	Média dos quadrados	Valor -F	Valor-p	
Modelo	37,59	13	2,89	2,91	0,0257	significante
A-DOC	0,3007	1	0,3007	0,3022	0,5906	
B-Vc	0,7501	1	0,7501	0,7539	0,3989	
C-fz	0,4369	1	0,4369	0,4391	0,5176	
D-p/np	6	1	6	6,03	0,0267	
AB	3,14	1	3,14	3,16	0,0958	
AC	3,07	1	3,07	3,08	0,0996	
AD	9,65	1	9,65	9,7	0,0071	
BC	0,0037	1	0,0037	0,0037	0,9523	
BD	0,0921	1	0,0921	0,0926	0,7651	
CD	0,0593	1	0,0593	0,0596	0,8105	
A ²	0,1172	1	0,1172	0,1178	0,7362	
B ²	0,4169	1	0,4169	0,419	0,5272	
C ²	6,95	1	6,95	6,98	0,0185	
Resíduos	14,93	15	0,995			
Falta de ajuste	13,32	10	1,33	4,16	0,0646	Não significante
Erro	1,6	5	0,3203			
	52,52	28				

Fonte: autor

Tabela 8 - Resultados anova para rugosidade Rmax

Variáveis	Soma dos quadrados	df	Média dos quadrados	Valor -F	Valor-p	
Modelo	1,31	13	0,1006	2,6	0,0399	significante
A-DOC	0,0035	1	0,0035	0,0899	0,7685	
B-Vc	0,0656	1	0,0656	1,7	0,2124	
C-fz	0,0213	1	0,0213	0,5508	0,4695	
D-p/np	0,1519	1	0,1519	3,93	0,0662	
AB	0,0518	1	0,0518	1,34	0,2655	
AC	0,1046	1	0,1046	2,7	0,1209	
AD	0,3028	1	0,3028	7,83	0,0135	
BC	0,0002	1	0,0002	0,0048	0,9455	
BD	0,0039	1	0,0039	0,1011	0,7549	
CD	0,0036	1	0,0036	0,0926	0,7651	
A ²	0,0195	1	0,0195	0,5028	0,4891	
B ²	0,0212	1	0,0212	0,5478	0,4707	
C ²	0,2986	1	0,2986	7,72	0,0141	
Resíduos	0,5803	15	0,0387			
Falta de ajuste	0,5378	10	0,0538	6,32	0,0276	significante
Erro	0,0425	5	0,0085			
	1,89	28				

Fonte: autor